

ISSN 1999-494X (Print)  
ISSN 2313-6057 (Online)

**Журнал Сибирского  
федерального университета  
Техника и технологии**

**Journal of Siberian  
Federal University  
Engineering & Technologies**

**2021 14 (2)**

ISSN 1999-494X (Print)  
ISSN 2313-6057 (Online)

2021 14(2)

# Журнал Сибирского федерального университета Техника и технологии

---

## Journal of Siberian Federal University Engineering & Technologies

Журнал включен в «Russian Science Citation Index» на платформе «Web of Science»

Индексируется Российским индексом научного цитирования (НЭБ), представлен в международных и российских информационных базах: Ulrich's periodicals directory, EBSCO (США), Google Scholar, ProQuest, Erihplus, READera, КиберЛенинке.

Включен в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» Высшей аттестационной комиссии.

---

**Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии.  
Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies.**

Учредитель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет» (СФУ)

Главный редактор: *В.А.Кулагин*. Редактор *И.А.Вейсиг*. Корректор *С.В.Хазаржан*.  
Компьютерная верстка *Е.В. Гревцовой*

№ 2. 30.03.2021. Индекс: 42328. Тираж: 1000 экз.

Свободная цена

Адрес редакции и издательства: 660041 г. Красноярск, пр. Свободный, 79, оф. 32-03.

Отпечатано в типографии Издательства БИК СФУ  
660041 г. Красноярск, пр. Свободный, 82а.

*Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 77-28722 от 29.06.2007 г.,  
выданное Федеральной службой по надзору в сфере массовых коммуникаций,  
связи и охраны культурного наследия.*

<http://journal.sfu-kras.ru>

Подписано в печать 24.03.2021. Формат 84x108/16. Усл. печ. л. 9,2.

Уч.-изд. л. 8,7. Бумага тип. Печать офсетная. Тираж 1000 экз. Заказ № 13197.

Возрастная маркировка в соответствии с Федеральным законом № 436-ФЗ: 16+

## CHIEF EDITOR

Vladimir A. Kulagin, Head of the Department of Heat Technology and Fluid Dynamics of Polytechnic Institute of SibFU, Doctor of Engineering Sciences, Full Professor, Honorary Worker of Science and Technology of the Russia

---

## EDITORIAL BOARD

- Sereeter Batmönkh, Institute of Heat Engineering and Industrial Ecology Mongolian Academy of Sciences, Mongolia;
- Yuri Galerkin, Saint Petersburg State Polytechnic University, Russia;
- Eugene Garin, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia;
- Vladimir Zuev, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, Tomsk, Russia;
- Juriy Koziratzky, Military Education and Research Centre of Military-Air Forces "Military-Air Academy name after N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin", Voronezh, Russia;
- Genius Kuznetsov, Tomsk Polytechnic University, Russia;
- Feng-Chen Li, Sino-French Institute of Nuclear Engineering and Technology Sun Yat-Sen University, Zhuhai, China;
- Dmitriy Markovich, Institute of Thermophysics Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, Novosibirsk, Russia;
- Valery Mironov, Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia;
- Vladimir Moskvichev, Institute of Computational Technologies of the Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, Krasnoyarsk, Russia;
- Bernard Nacke, Institute of Electrotechnology Leibniz University, Hannover, Germany;
- Valeriy Nikulin, Kamsk Institute of Humanitarian and Engineering Technologies, Izhevsk, Russia;
- Valery Okulov, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark;
- Oleg Ostrovski, University of New South Wales, Australia;
- Harald Oye, Norwegian University of Science and Technology, Norway;
- Vasili Panteleev, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia;
- Petr Polyakov, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia;
- Ibragim Khisameev, Kazan State Technological University, Russia;
- Nikolai Zuglenok, Federal Research Center KSC Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia;
- Vladimir Shaidurov, Institute of Computational Modelling Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, Russia;
- Anatoly Shvidenko, International Institute for Applied Systems Analysis, Austria.

## CONTENTS

<b>Gheorghe Dobra, Sorin Iliev, Lucian Cotet, Alina Boianiu, Iosif Hulka, Lidia Kim, Gina Alina Catrina and Laurentiu Filipescu</b> Heavy Metals as Impurities in the Bayer Production Cycle of the Aluminum Hydroxide from Sierra Leone Bauxite. Preliminary Study .....	<b>151</b>
<b>Lyutsiya M. Karimova, Dmitry V. Zakharyan and Yaroslav E. Agapitov</b> Research on Hydrometallurgical Processing of Gold-Concentrate of Jamgyr Deposit .....	<b>166</b>
<b>Vladimir I. Golik, Maria Yu. Liskova, Yadviga G. Nebylova and Chaines B. Kongar-Syuryun</b> Physical and Chemical Technologies of Metal Mining and Water Resources .....	<b>175</b>
<b>Gregory V. Krasavin and Anatoly I. Matiushenko</b> Reconstruction of the Water Supply to the City of Igarka of Krasnoyarsk Region .....	<b>187</b>
<b>Denis D. Palkin and Andrey A. Chekalkin</b> Numerical Modeling of Tribological Characteristics of Fibrous Polymer Composite Materials .....	<b>198</b>
<b>Milen Dimov and Zhuldyz Smailova</b> Oxidative Destruction of Vulcanized by Changing the Dispersion Composition of Oxidized Vulcanized .....	<b>207</b>
<b>Kymbat S. Zhansakova, Gregory S. Russkikh and Evgeny N. Eremin</b> The Effect of Vulcanization Accelerator on the Properties of Porous Rubber .....	<b>215</b>
<b>Valeriya V. Pavlova, Marina D. Sokolova and Aytalina F. Fedorova</b> Influence of the Content and Nature of the Plasticizer on the Properties of Butadiene-Nitrile Rubber .....	<b>222</b>
<b>Alexey N. Sochnev</b> Production Planning Based on a Genetic Algorithm Controlled Simulation Model .....	<b>233</b>
<b>Said S. Shaumarov</b> New Methodology for Designing External Fencing Structures Energy Efficient Civil Buildings .....	<b>244</b>
<b>Ekaterina S. Skornyakova, Dmitry V. Lichargin and Pavel V. Polunian</b> Game Graph and Formats Approach for Mixlingual Data Ontology for Geological and Marketing Tasks .....	<b>252</b>

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Георге Добра, Сорин Или, Луциан Котец, Алина Боиангиу, Джозеф Хулка, Лидия Ким, Джина Алина Цатрина, Лауренцию Филипеску</b> Тяжелые металлы как примеси в байерном производственном цикле гидроксида алюминия из сьерра-леонбуксита. Предварительное исследование .....	<b>151</b>
<b>Л. М. Каримова, Д. В. Захарьян, Я. Е. Агапитов</b> Исследования по гидрометаллургической переработке золотосодержащего концентрата месторождения «Джамгыр» .....	<b>166</b>
<b>В. И. Голик, М. Ю. Лискова, Я. Г. Небылова, Ч. Б. Конгар-Сюрюн</b> Физико-химические технологии добычи металлов и водные ресурсы .....	<b>175</b>
<b>Г. В. Красавин, А. И. Матюшенко</b> Реконструкция водоснабжения г. Игарки Красноярского края .....	<b>187</b>
<b>Д. Д. Палкин, А. А. Чекалкин</b> Численное моделирование коэффициентов трения однонаправленных волокнистых композитов тетрагональной структуры .....	<b>198</b>
<b>Милен Димов, Жулдыз Смаилова</b> Окислительное разрушение вулканизатов при изменении дисперсионного состава окисленного вулканизата .....	<b>207</b>
<b>К. С. Жансакова, Г. С. Русских, Е. Н. Еремин</b> Влияние ускорителя вулканизации на свойства пористых резин .....	<b>215</b>
<b>В. В. Павлова, М. Д. Соколова, А. Ф. Федорова</b> Влияние содержания и природы пластификатора на свойства бутадиен-нитрильной резины .....	<b>222</b>
<b>А. Н. Сочнев</b> Планирование производства на основе управляемой генетическим алгоритмом имитационной модели .....	<b>233</b>
<b>С. С. Шаумаров</b> О новой методологии проектирования наружных ограждающих конструкций энергоэффективных гражданских зданий .....	<b>244</b>
<b>Е. С. Скорнякова, Д. В. Личаргин, П. В. Полуян</b> Игровой граф и форматный подход для смешанно-языковой онтологии данных в задачах геологии и маркетинга .....	<b>252</b>

DOI: 10.17516/1999-494X-0296

УДК 661.862'023

## Heavy Metals as Impurities in the Bayer Production Cycle of the Aluminum Hydroxide from Sierra Leone Bauxite. Preliminary Study

Gheorghe Dobra<sup>a</sup>, Sorin Iliev<sup>b</sup>,  
Lucian Cotet<sup>b</sup>, Alina Boiangiu<sup>\*b</sup>,  
Iosif Hulka<sup>c</sup>, Lidia Kim<sup>d</sup>,  
Gina Alina Catrina<sup>d</sup> and Laurentiu Filipescu<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*Alro Slatina  
Slatina, Romania*

<sup>b</sup>*Alum Tulcea  
Tulcea, Romania*

<sup>c</sup>*Universitatea Politehnica Timisoara  
Timisoara, Romania*

<sup>d</sup>*INCD Ecoind  
Bucuresti, Romania*

Received 12.12.2020, received in revised form 07.02.2021, accepted 21.03.2021

**Abstract.** This paper is reporting the data of a preliminary study on heavy metals distribution in the fluid and solid phases involved in dry and classified aluminium hydroxide production through Bayer process. For heavy metals released in the fluid phases, the main source of contamination is the bauxite through its mineralogical phases soluble or insoluble in alkaline solution. It was shown that predominant way to transfer contaminating elements in aluminium hydroxide particles is the occlusion of very fine particles coming from mineralogical phases of bauxite residue. New born mineralogical phases from bauxite residue, like poor crystallized sodalite and cancrinite, are the most active occlusion contaminants.

**Keywords:** aluminium hydroxide, heavy metals, occlusion, bauxite, bauxite residue, Bayer process.

Citation: Dobra G., Iliev S., Cotet L., Boiangiu A., Hulka I., Kim L., Catrina G. A., Filipescu L. Heavy metals as impurities in the bayer production cycle of the aluminum hydroxide from Sierra Leone bauxite. Preliminary study, J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2021, 14(2), 151-165. DOI: 10.17516/1999-494X-0296

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

\* Corresponding author E-mail address: aboiangiu@alum.ro

# Тяжелые металлы как примеси в байерном производственном цикле гидроксида алюминия из сьерра-леонбуксита. Предварительное исследование

Георге Добра<sup>а</sup>, Сорин Или<sup>б</sup>, Луциан Котец<sup>б</sup>,  
Алина Бонангиу<sup>б</sup>, Джозеф Хулка<sup>в</sup>, Лидия Ким<sup>г</sup>,  
Джина Алина Цатрина<sup>г</sup>, Лауренцию Филипеску<sup>б</sup>

<sup>а</sup>*Алро Слатина*  
*Румыния, Слатина*

<sup>б</sup>*Alum Tulcea*

*Румыния, Тулча*

<sup>в</sup>*Политехнический университет Тимишоары*

*Румыния, Тимишоара*

<sup>г</sup>*INCD Ecoind*

*Румыния, Бухарест*

**Аннотация.** В этой статье приводятся данные предварительного исследования распределения тяжелых металлов в жидкой и твердой фазах, участвующих в производстве сухого и классифицированного гидроксида алюминия в процессе Байера. Для тяжелых металлов, выделяющихся в жидких фазах, основным источником загрязнения является боксит через его минералогические фазы, растворимые или нерастворимые в щелочном растворе. Было показано, что преобладающим способом переноса загрязняющих элементов в частицах гидроксида алюминия является окклюзия очень мелких частиц, происходящих из минералогических фаз бокситового остатка. Новорожденные минералогические фазы из бокситовых остатков, такие как плохо кристаллизованный содалит и канкринит, являются наиболее активными загрязняющими примесями.

**Ключевые слова:** гидроксид алюминия, тяжелые металлы, окклюзия, бокситы, бокситовый остаток, байерский процесс.

Цитирование: Добра, Георге. Тяжелые металлы как примеси в байерном производственном цикле гидроксида алюминия из сьерра-леонбуксита. Предварительное исследование / Георге Добра, Луциан Котец, Сорин Или, Алина Бонангиу, Джозеф Хулка, Лидия Ким, Джина Алина Цатрина, Лауренцию Филипеску // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2021, 14(2). С. 151-165. DOI: 10.17516/1999-494X-0296

## 1. Introduction

In the alumina industry, the main sources of heavy metals are bauxite, as a raw material, auxiliary products with heavy metal content (lime, additives used to control process parameters and other materials used for proper operation and maintenance of the equipment). The transition of heavy metals from bauxite into the Bayer production cycle (and hence, contamination of the alumina, by-products and residual products) is part of a specific way of distribution and contamination with heavy metals, characteristic for each type of processed bauxite or each application variant of the alumina Bayer process. Ultimately, the entire process is dependent on the technological efficiency of the equipment used and on the particular parameters adopted as optimal in each production unit.

Alum SA Tulcea, Romania, uses only one type of bauxite – lateritic bauxite from Sierra Leone. From this point of view, there is a significant advantage in controlling the entire technological process, mainly in terms of products contamination factors and mindful environmental management. In addition, compared to other types of bauxite available for processing in the aluminium industry, lateritic bauxites are purer and easier to process than karst bauxites. Thus, the following significant mineralogical and chemical particularities were identified in defining the technological value of bauxite in Sierra Leone (i. e. the advantages and disadvantages of using this type of bauxite in the manufacture of alumina): a) The major mineralogical components identified in the bauxite samples were gibbsite (30–40 % available  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), alumino-goethite (20–30 %) and alumino-hematite (less than 5 %); b) The entire mass of  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  consists only of solid solutions: alumino-goethite and alumino-hematite, compounds that incorporate large amounts of non-extractable  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and intensify the process of boehmitic reversal in the settling and washing vessels of bauxite residue, increasing the residue factor from 1.5 to 2.3 and producing relatively higher losses of  $\text{Na}_2\text{O}$ ; c) The minor mineralogical components of bauxite are: kaolin, quartz, zircon, ilmenite, rutile and anatase, but their concentration is relatively low compared to the major constituents; d) Approximately 30–40 % of the mineralogical phases from Sierra Leone bauxite are in an amorphous state, but most of these amorphous phases come from the crystalline components listed above due to excessive wear during the formation of bauxite deposit and its subsequent metamorphic transformations; e) Experimental data collected after the digestion stage of this type of bauxite have shown that a compact mass of approximately 50–55 % of bauxite passes completely untransformed through all the previous technological stages of the Bayer process; f) The major mineralogical components identified in the bauxite residue are: alumino – goethite (30–35 %), alumino-hematite (approximately 12–15 %) and sodalite – cancrinite – katoite mixtures 20–25 %; g) The minor mineralogical components of the bauxite residue are: gibbsite, calcite and other alkaline earth carbonates and sulfates, quartz, rutile, anatase and others at very low concentrations; h) The soluble components of alumino-gibbsitic bauxite from Sierra Leone are concentrated up to the solubility limit in the Bayer concentrated liquors and are unevenly distributed between the spent liquor and the bauxite residue. Bayer liquors transport and contaminate fluids throughout the entire technological cycle, but only a tiny portion reaches the finished products. The rest accumulates in the bauxite residue [1, 2].

The purpose of this paper is to conduct a preliminary study on the distribution of impurities in the Bayer cycle of manufacturing aluminium hydroxide and calcined alumina in a short period, before and during experiments on the manufacture of dry and classified hydrate sorts. The paper does not aim to highlight the purity of the fluids and solid phases from the production line, but only to identify the sources of contamination and the ways to eliminate or alleviate contamination of the final products.

## 2. Experimental part

### 2.1. Sample collection and chemical analysis

Determination of the heavy metal content in fluid and solid phases from the aluminium hydroxide production cycle was performed after starting of all research facilities for development of a technology for obtaining wet, dry, ground and classified aluminium hydroxide. These equipment were acquired under the project co-funded by the European Regional Development Fund through the Competitiveness Operational Program 2014–2020 «Endow the research and Development of SC ALUM SA with independent and efficient research facilities to support the economic competitiveness and business

development): «Independent equipment / Installation for research and development of the technology of wet aluminium hydroxide classification», «Independent equipment / Installation for research and development of technology to obtain the dried aluminium hydroxide» and «Independent equipment / Installation for research and development of the technology of grinding and screening the dried aluminium hydroxide».

Firstly, during the experiments, representative samples of bauxite, concentrated and spent Bayer liquors were collected in a few rounds. Then, some hours before all the equipment were shut down, representative samples of bauxite residue and aluminium hydroxide were also collected from previously scheduled points of measurements for the present preliminary test study. The multiple samples collected at each sampling point for heavy metals determination were cumulated and mediated and then, sent to laboratory for analyses. Sampling and analysis of each element of interest were done in accordance with European standards. The actual determinations of heavy metals concentration in the liquid and solid phases were performed using the ICP-OES and the ICP-MS method, both recommended by the above-mentioned standards.

### *2.2. Mineralogical analysis*

Acquisition of data was achieved on the BRUKER D8 ADVANCE diffraction instrument by means of the DIFFRAC plus XRD Commander (Bruker AXS) software through the Bragg-Brentano diffraction method, coupling  $\Theta$ – $\Theta$  on vertical configuration. The data processing was performed by means of the DIFFRAC plus BASIC Evaluation Package software, version EVA12, 2006 of the software package containing DIFFRAC plus BASIC (Bruker AXS) and the data base ICDD PDF-2 Release 2006. Other details were given in [2].

### *2.3. Microscopical analysis*

The morphology and elemental composition of the particulate material samples (bauxite, bauxite residue and aluminium hydroxide) was characterized by scanning electron microscopy (SEM: Quanta FEG 250, FEI, The Netherlands) using back scattered electron detector (BSD) coupled with energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS: using Apollo SSD detector, EDAX Inc. US). The microstructure and EDS analysis were performed at about 10 mm working distance (WD) in low vacuum mode in order to avoid surface charging and damage of the analysed material.

## **3. Experimental data**

### *3.1. Heavy metals*

The analysed heavy metals were divided into two groups: the heavy metal group with medium toxicity potential and the heavy metal group with high toxicity potential. The group of heavy metals with medium toxicity potential included total chromium summing trivalent chromium (insoluble in Bayer liquors) and hexavalent chromium, and the group of heavy metals with high toxicity potential included hexavalent chromium (soluble in water and Bayer liquors). This partitioning is justified by the fact that in Bayer liquors, the reducing character is predominating, and the chance of trivalent chromium to oxidize in the manufacturing cycle of aluminium hydroxide is zero.

In the case of bauxite residue stored in monitored dumps, the chance of trivalent chromium to oxidize is minimal, and as a result, only small amounts of hexavalent chromium were found in the

bauxite residue. Also, the results of our previous research corroborated with other data from the literature [3–6] show that changing the pH of Bayer liquors does not affect the status of chromium in these liquors.

In the Tables 1 and 2 and in the Fig. 1 and 2 there are presented the experimental data, with the mention that in Table 1 and Fig. 1, the concentrations are expressed in ppm, and in the Table 2 and Fig. 2, the concentrations are expressed in ppb. These data show that bauxite has a moderate content of impurities, similar to that of other types of lateritic bauxite. Only the mineralogical peculiarities, specific to the alumino-goethite bauxites, make the difference in terms of the contamination capacity of aluminium hydroxide through the mechanisms of surface absorption and occlusion, respectively.

The total chromium concentration can be considered quite normal, because this element is one of the minor components of bauxite, and chromium compounds (chromites) are insoluble in Bayer liquors. As a source of pollution, only hexavalent chromium should be thoroughly considered, as was shown above. Cadmium, arsenic and mercury are found in common concentrations throughout the Bayer circuit when Sierra Leone bauxite is processed. Their concentration in aluminum hydroxide are laying close to the detection limit and could not raise suspicions. The real sources of pollution of aluminum hydroxide are copper and zinc with concentrations of tens of ppm in bauxite. Diminishing of the copper and zinc content in Bayer liquors is possible by concentrating the spent liquors up to 250–300 g/L Na<sub>2</sub>O and precipitating these elements together with the organic compounds and respectively, by discharging them in the crusts, and eventually, eliminating them together as production waste. As for copper, zinc, lead and total chromium, these elements might be taken up by the freshly precipitated aluminum hydroxide, as particulate occlusions. In this case, reduction of the content of copper, zinc,

Table 1. Elements from class of heavy metals with medium toxic potential in the manufacturing cycle of aluminium hydroxide

Source/Elements	Zinc, Zn	Copper, Cu	Lead, Pb	Chromium, Cr
Bauxite, ppm	15,38	36,29	18,60	233.5
Bauxite residue, ppm	46.60	68,70	12,39	541.0
Bayer concentrated liquor, ppm	23.2	5.23	0.77	5.32
Bayer spent liquor, ppm	0,15	0,04	<0,007	0,118
Aluminium hydroxide, ppm	0,404	2,771	0,995	0,282

Table 2. Elements from the class of heavy metals with high toxic potential in the manufacturing cycle of aluminium hydroxide

Source/Elements	Chromium, Cr <sup>6+</sup>	Cadmium, Cd	Arsenic, As	Mercury, Hg
Bauxite, ppb	50	190	1668	230
Bauxite residue, ppb	50	384	857	110
Bayer concentrated liquor, ppb	60	18	1000	200
Bayer spent liquor, ppb	40	40	40	39
Aluminium hydroxide, ppb	50	80	40	50

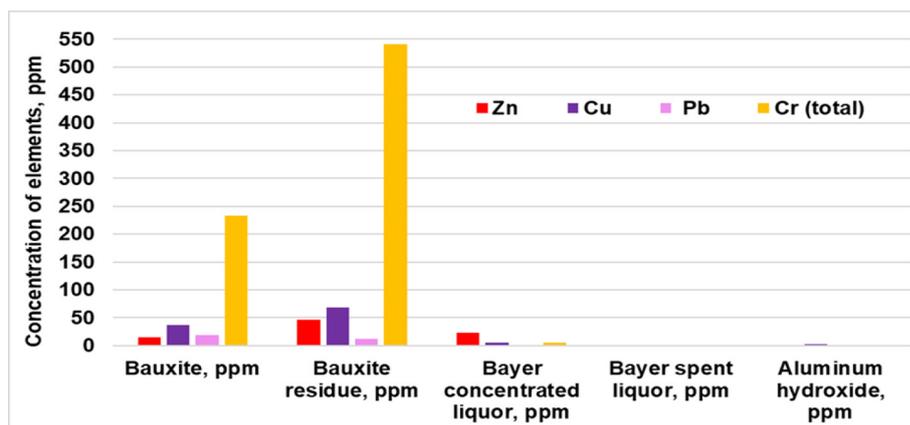


Fig. 1. Elements from the class of heavy metals with moderate toxic potential in the manufacturing cycle of aluminium hydroxide

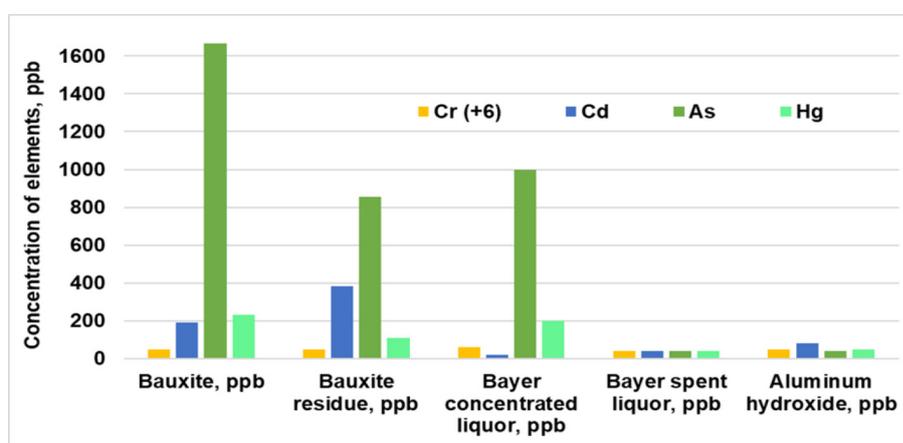


Fig. 2. Elements from the class of heavy metals with high toxic potential in the manufacturing cycle of aluminium hydroxide

lead and chromium will be done in fine filtration stage of the Bayer concentrated liquors, i. e. in red filtration, where new filters and new filter membranes with better performance than those currently used are needed.

The measured concentrations from the Tables 1 and 2, and the Fig. 1 and 2 are in good agreement with the data provided by other alumina production units. An edifying example about the level of contamination is the content of heavy metals in bauxite residue given below: cadmium (Cd, 1.3 ppm and Rfc – 2), total chromium (Cr, 1350 ppm and Rfc – 80), copper (Cu, 52 ppm and Rfc – 50), lead (Pb, 50 ppm and Rfc – 100), nickel (Ni, 80 ppm and Rfc – 75), mercury (Hg, 0.3 ppm and Rfg – 1), arsenic (As, 1.0 ppm and Rfc – 50), zinc (Zn, 80 ppm and Rfc – 300), cobalt (Co 16.0 ppm and Rfc – 40), manganese (Mn, 406 ppm and Rfc – 850), antimony (Sb, 0.1 ppm and Rfc – 6), and selenium (Se, 4.0 and Rfc – 5). The Rfc specification is the reference concentration (in milligrams per kilogram) of toxic metals in soils, set by the Spanish authorities for the protection of human health (RD60/2009, 26 February 2009), taking into account the risks of water contamination and / or the risks of increasing

phytotoxicity in agriculture, land use, animal husbandry and forest protection [7–9]. In addition, due to the low concentrations of heavy metals there is practically not a concentration process of these elements in Bayer liquors, but only an accumulation in the bauxite residue. At most, tiny amounts appear as a surface contamination of the aluminum hydroxide [10].

An analysis model of the heavy metals distribution in Bayer cycle is offered by the Greek company Mytilineos SA, Agios Nikolaos, Viotia, Greece [11]. This company processes two types of bauxite: a local karstic bauxite (diasporic bauxite) and a lateritic bauxite purchased on the lateritic bauxite market, preferably a very reactive gibbsitic bauxite. The processed karstic bauxite comes from the Parnassus-Giona area and has the following mineralogical composition: 10–30 % boehmite, 20–50 % diasporite, 20–25 % hematite, 1–5 % calcite, 1–2 % quartz, 1–5 % kaolinite and 0.5–2 % anatase [12]. Lateritic bauxite processed along with karstic one is a known gibbsitic bauxite, not quite similar to Sierra Leone bauxite, because the iron is found in this type of bauxite only as hematite.

In the Table 3 there is shown the distribution of arsenic, chromium and vanadium in the main material flows of Bayer suitable variant technology for the raw materials described above. For other heavy metals the table refers only to the composition of concentrated and spent liquors. Comparing the data from Table 3 with those from Tables 1 and 2, and with Fig. 1 and 2, we can observe similarities and differences due exclusively to the mineralogical peculiarities of both bauxites.

Table 3. Heavy metals distribution in Bayer cycle at Mytilineos S.A., Agios Nikolaos, Greece

Elements	As	Cr	Mo	Ni	Si	V	W	Y
Concentrated Bayer liquor, ppm	110.8	1.4	318	4.8	544	295.2	2.27	<0.04
Bauxite residue, ppm	189	1265				903		
Bayer spent liquor, ppm	99.6	1.3	273	<4	520	3614	7.21	<0.04
Aluminium hydroxide, ppm	< 5	< 5				< 10		

The excess of chromium and vanadium in fresh and recycled Bayer liquors is justified not only by the high concentrations of these elements in karstic bauxite, but also by the fact that these elements usually accumulate in the liquors till the saturation, as is the case of all bauxites rich in these elements. Nevertheless, the chromium, although found in higher concentrations in karstic bauxites, accumulates only in the bauxite residue. In both cases, the concentrations of these three elements remain at very low values in the aluminum hydroxide.

### 3.2. Radioactive metals

In the last years there were made two integral reports on radioactivity level on the production line of the aluminium hydroxide. First report confirmed some older measurement data on rare occurrence of radio-nuclides in the Sierra Leone bauxite and in the bauxite residue disposal site at Alum SA Tulcea. In the second report, it turned out that concentrations of gamma radiation of radio-nuclides in the bauxite residue are mostly below the minimum detectable activity-AMD, according the ISO 11920/2010. Also, the total radioactivity level, measured on bauxite residue samples, is below the soil natural radioactivity,

which is about 40/Bq/kg. Both tests corroborate the conclusion that Sierra Leone bauxite used as raw materials in the production of alumina at Alum SA Tulcea does not contain radio-nuclides. The data are systematically presented in the Table 4.

Table 4. Radioactivity on Bayer aluminum hydroxide production line

Samples	Experimental results	Radioactive concentration/ radionuclide, units, Bq/kg	Estimated uncertainty (k=1)
1	2	3	4
<b>A. Sample 2 – Sierra Leone bauxite</b> A. The measurement in a plastic Sarpagan type (diameter 78 mm, height 42 mm), total mass sample (0,2099 ± 0,0010) kg, measurement duration 25200 s, on a plinth at a distance of 1,6 mm in the central position over detector	<b>Natural radionuclide <sup>40</sup>K:</b> <b>Natural radioactive series of thorium (<sup>232</sup>Th):</b> <sup>226</sup> Ra, from Natural radioactive series of uranium:	AMD * 15, 7 Bq/kg 38 Bq/kg (on the reference data 07.11.2017, 12:00 UT)	2,4 Bq/kg ± 8 Bq/kg
*AMD: minimum detectable activity in this case estimated to 6,3 Bq/kg for <sup>40</sup> K. Radionuclides from the natural radioactive series of thorium detected in samples are: <sup>228</sup> Ac (emissions gamma radiations with 338 keV), <sup>212</sup> Pb, <sup>212</sup> Bi and <sup>208</sup> Tl. Radionuclides from the natural radioactive series of uranium detected in samples are: <sup>234</sup> Th, <sup>214</sup> Pb și <sup>214</sup> Bi (the last two are descendents of <sup>226</sup> Ra, from series <sup>238</sup> U and <sup>226</sup> Ra			
<b>B. Sample 4 – Sierra Leone bauxite</b> B. The measurement in a plastic Sarpagan type (diameter 78 mm, height 42 mm), total mass sample (0,1966±0,0010) kg, The measurement duration 24.000 s, on a plinth at a distance of 1,6 mm in the central position over detector	<b>Natural radionuclid <sup>40</sup>K:</b> <b>Natural radioactive series of thorium (<sup>232</sup>Th):</b> <sup>226</sup> Ra, from natural radioactive series of uranium:	10 Bq/kg 15,1 Bq/kg 22 Bq/kg (on the reference data 07.11.2017, 12:00 UT)	± 5 Bq/kg ± 2,4 Bq/kg ± 7 Bq/kg
Radionuclides from the natural radioactive series of thorium detected in samples are: <sup>228</sup> Ac (emissions gamma radiations with 338 keV), <sup>212</sup> Pb, <sup>212</sup> Bi and <sup>208</sup> Tl. Radionuclides from the natural radioactive series of uranium detected in samples are: <sup>234</sup> Th, <sup>214</sup> Pb și <sup>214</sup> Bi (the last two are descendents of <sup>226</sup> Ra, from series <sup>238</sup> U and <sup>226</sup> Ra			
<b>C. Sample 1 – Bayer mother liquor.</b> The measurement in a plastic Marinelli type with the volume 0,9 L, total mass sample (1,0574 ± 0,0010) Kg, measurement duration 25.000 s, with the sample in the central position, directly on detector	<b>Natural radionuclide <sup>40</sup>K:</b> <b>Natural radioactive series of thorium (<sup>232</sup>Th):</b> <sup>226</sup> Ra, from Natural radioactive series of uranium	5,3 Bq/kg < AMD* 4,1 Bq/kg (on the reference data 07.11.2017, 12:00 UT)	±1,0 Bq/kg ±1,0 Bq/kg
Radionuclides from natural radioactive series of the torium detected in samples, were: <sup>228</sup> Ac, <sup>212</sup> Pb, <sup>212</sup> Bi și <sup>208</sup> Tl. Radionuclides from natural radioactive series of uranium, detected in the samples, were: <sup>234</sup> Th, <sup>214</sup> Pb și <sup>214</sup> Bi (the last two are descending from <sup>226</sup> Ra, from the series of <sup>238</sup> U and <sup>226</sup> Ra			
<b>D. Sample 5 – Bauxite residue (raw, dried).</b> The measurement in a plastic Sarpagan type (diameter 78 mm, height 42 mm), total mass sample (0,1701± ±0,0005) Kg, measurement duration 15.000 s, on a plinth at a distance of 1,6 mm in the central position over detector	<b>Natural radionuclide <sup>40</sup>K:</b> <b>Natural radioactive series of thorium (<sup>232</sup>Th):</b> <sup>226</sup> Ra, from Natural radioactive series of Uranium:	< AMD * 18,4 Bq/kg 36 Bq/kg (on the reference data 07.11.2017, 12:00 UT)	± 2,5 Bq/kg ± 8 Bq/kg
Radionuclides from the natural radioactive series of torium detected in samples are: <sup>228</sup> Ac (emissions gamma radiations with 338 keV), <sup>212</sup> Pb, <sup>212</sup> Bi and <sup>208</sup> Tl. Radionuclides from the natural radioactive series of uranium detected in samples are: <sup>234</sup> Th, <sup>214</sup> Pb și <sup>214</sup> Bi (the last two are descendents of <sup>226</sup> Ra, from series <sup>238</sup> U and <sup>226</sup> Ra			

Continuation of Table 4

1	2	3	4
<b>E. Sample 6 – Bauxite residue washed and, dried).</b> The measurement in a plastic Sarpagan type (diameter 78 mm, height 42 mm), total mass sample (0,1606 ± 0,0005) Kg., measurement duration 24.000 s, on a plinth at a distance of 1,6 mm in the central position over detector	<b>Natural radionuclide <sup>40</sup>K:</b> <b>Natural radioactive series of thorium (<sup>232</sup>Th):</b> <sup>226</sup> Ra, from Natural radioactive series of Uranium:	5,2 Bq/kg 26,9 Bq/kg 42 Bq/kg (on the reference data 07.11.2017, 12:00 UT)	± 5,6 Bq/kg ± 3,1 Bq/kg ± 9 Bq/kg
Radionuclides from the natural radioactive series of thorium detected in samples are: <sup>228</sup> Ac (emissions gamma radiations with 338 keV), <sup>212</sup> Pb, <sup>212</sup> Bi and <sup>208</sup> Tl. Radionuclides from the natural radioactive series of uranium detected in samples are: <sup>234</sup> Th, <sup>214</sup> Pb and <sup>214</sup> Bi (the last two are descendents of <sup>226</sup> Ra, from series <sup>238</sup> U and <sup>226</sup> Ra)			
<b>F. Sample 3 – Aluminum hydroxide.</b> The measurement in a plastic Sarpagan type (diameter 78 mm, height 42 mm), total mass sample (0,2125 ± 0,0010) Kg, measurement duration 26.500 s, on a plinth at a distance of 1,6 mm in the central position over detector	<b>Natural radionuclide: <sup>40</sup>K:</b> <b>Natural radioactive series of thorium (<sup>232</sup>Th):</b> <sup>226</sup> Ra, from Natural radioactive series of uranium:	< AMD * < AMD * 4.0 Bq/kg (on the reference data 07.11.2017, 12:00 UT)	± 6.0 Bq/kg
Radionuclides from the natural radioactive series of thorium detected in samples are: <sup>228</sup> Ac, <sup>212</sup> Pb, <sup>212</sup> Bi și <sup>208</sup> Tl. Radionuclides from the natural radioactive series of uranium detected in samples are: <sup>234</sup> Th, <sup>214</sup> Pb și <sup>214</sup> Bi (the last two are descendents of <sup>226</sup> Ra, from series <sup>238</sup> U and <sup>226</sup> Ra)			
<b>F. Sample 7 – Alumina gamma.</b> The measurement in a plastic Sarpagan type (diameter 78 mm, height 42 mm), total mass sample 0,2032 ± 0,0010) Kg, measurement duration 23.100 s, on a plinth at a distance of 1,6 mm in the central position over detector	<b>Natural radionuclide: <sup>40</sup>K:</b> <b>Natural radioactive series of thorium (<sup>232</sup>Th):</b> <sup>226</sup> Ra, from Natural radioactive series of uranium:	< AMD * < AMD * 15.0 Bq/kg (on the reference data 07.11.2017, 12:00 UT)	± 6.0 Bq/kg
*AMD: minimum detectable activity in this case estimated to 6,3 Bq/kg for <sup>40</sup> K and respectively, 3,6 Bq/kg for <sup>228</sup> Ac, from series <sup>232</sup> Th). Radionuclides from the natural radioactive series of thorium detected in samples are: <sup>228</sup> Ac, <sup>212</sup> Pb, <sup>212</sup> Bi și <sup>208</sup> Tl. Radionuclides from the natural radioactive series of uranium detected in samples are: <sup>234</sup> Th, <sup>214</sup> Pb și <sup>214</sup> Bi (the last two are descendents of <sup>226</sup> Ra, from series <sup>238</sup> U and <sup>226</sup> Ra)			

The measurements were made by Horia Hulubei National Institute for R&D in Physics and Nuclear Engineering (IFIN-HH).

### 3.3. Aluminium hydroxide contamination by occlusion

There are some simple mechanisms, which can explain how the metallic impurities contaminate the aluminium hydroxide. Sodium simply is found embedded in some stable forms by substitution of the aluminium ions in hydroxide crystal lattice. But, this happened only under specific conditions concerning supersaturation level and supersaturation variation rates. Actually, sodium can contaminate aluminium hydroxide in any stage of the aluminate decomposition process. Some of the other impurities follow, almost always, the same incorporation mechanism as sodium, but not at so larger scale as sodium. Moreover, the contaminated fractions are mobile and can get into the final product modified or unmodified, also in any stage of decomposition process. Identifying the source of these contaminated fractions is very important for removing the cause and raising the quality of aluminium hydroxide.

The occluded fraction of soluble impurities happen mainly in the agglomeration process of polycrystalline particles by closing inside the polycrystalline aggregates some small drops of spent liquor, variable and non-uniformly dispersed as sizes and numbers. The incorporated droplets no longer communicate through open channels with the outside liquor and consequently, the intensive washings of aluminium hydroxide cannot remove (no matter how well the washing is done) the remaining spent liquor isolated in mass of the aggregated particles.

The lixiviated fraction of impurities is that part of impurities remaining on the surface of aluminium hydroxide particles as diluted spent liquor. Most of these impurities can be removed by washing and their concentration in the final product depends on the washing efficiency. A part of soluble fraction of impurities is generated by precipitation of organic acids as salts with metallic impurities, their chemical adsorption onto the particles surface, or their inclusion in the aluminium hydroxide crystals as sodium or of other metals compounds. Parts of these fractions may be dissolved in the washing stage, and the rest are locked in the crystalline lattice of aluminium hydroxide, and finally decomposes upon calcination releasing the impurities as oxides. It is possible that, at high concentrations of organic acids in the spent liquor, some organic acid salts to precipitate in the form of distinct crystals together with aluminium hydroxide. In this case, the advanced washing of the aluminium hydroxide particles may lead to the partial or total elimination of this form in impurity of the aluminium hydroxide [10].

Insoluble compounds or chemically bound impurities are fractions more active in contamination process than the soluble impurities. They can be occluded in the agglomerating particles in any stage of the aluminate liquors decomposition process. Also, they can promote predominantly the hetero-nucleation at smaller particle surface, shaping bridges that stabilize the polycrystalline aggregates in the agglomeration process. To prevent or at least control the contamination process by occlusion of insoluble compounds or chemically bound impurities it is necessary to identify the sources and to remove or alleviate their effect. Most of these contaminants are coming in the Bayer concentrated liquor and microscopic particles originate from bauxite mineralogical compounds or are born as crystalline phases during bauxite Bayer digestion stage.

Sierra Leone bauxite contains the following mineralogical components: Gibbsite –  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ; Goethite-alumina –  $(\text{Fe}_{(1-x)}\text{Al}_x)\text{O}(\text{OH})$ ; Hematite-alumina –  $(\text{Fe}_{(1-x)}\text{Al}_x)_2\text{O}_3$ ; Kaolinite –  $\text{Al}_4(\text{OH})_8(\text{Si}_4\text{O}_{10})$ ; Quartz –  $\text{SiO}_2$ ; Zircon –  $\text{ZrSiO}_4$ ; Ilmenite –  $\text{FeTiO}_3$ ; Anatase –  $\text{TiO}_2$ ; and calcium, potassium, magnesium, phosphorus, vanadium and other minor components as mineral salts. Bauxite residue contains the same mineralogical phases as bauxite, but in other ratios and the new born phases: sodalite –  $\text{Na}_8(\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24})\text{Cl}_2$ , katoite –  $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)(\text{OH})_8$ , and magnetite –  $\text{Fe}_2\text{O}_4$ . All these materials contain crystalline phases and amorphous phases (20–40 %). Also, the new born phases can be well crystallized and amorphous or at least, bearing poor crystalized structures.

The morphology and elemental composition of the particulate material samples (bauxite, bauxite residue and aluminium hydroxide) were characterized by scanning electron microscopy (SEM: Quanta FEG 250, FEI, The Netherlands) using back scattered electron detector (BSD) coupled with energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS): using Apollo SSD detector, EDAX Inc. US). The microstructure and EDS analysis were performed at about 10 mm working distance (WD) in low vacuum mode in order to avoid surface charging and damage of the analysed material.

SEM microscopy coupled with EDX spectroscopy is an effective tool for detecting impurities in any natural material or manufactured by any technology. Furthermore, the method allows identifica-

tion of the source and procedures to avoid impurification by controlling the technology in the original stage where the source is contaminating the aluminium hydroxide particles. This ultimate advantage has led to the application of SEM microscopy coupled with EDX spectroscopy to the analysis of unmilled and milled aluminium hydroxide samples. The results and conclusions of the study are presented below.

Microscopic analysis concerns three samples from the fractions of dried, milled and classified aluminium hydroxide. Its about the fractions: 0–10 microns, 0–20 microns and 0–45 microns. Initially, some suspicions were raised about possible segregation of the contaminated particles and their accumulation in the smallest fractions. But this event did not have occurred very often under our experimental circumstances.

In the Fig. 3 and Fig. 4 there are given the micrographs of two particles of aluminium hydroxide with high purity. These samples should be the reference material in good choice of the process operation parameters. In the real Bayer process the aluminium hydroxide particles are carrying always smaller quantities of  $\text{Na}_2\text{O}$ , accounting for 0.3–0.4 %, and only under very careful conditions the  $\text{Na}_2\text{O}$  could be dropped under 0.3 %. As was mentioned before some poor crystallized or amorphous mineral phase from bauxite (non full reacted mass) and bauxite residue are always prone to deliver mobile reactive molecular entities, which can be quickly occluded into the aluminium particles in any stage of their growth.

There are a lot of mineralogical phases in Bayer cycle. Some of them are well crystallized, with distinctive crystalline faces of various sizes. Other are dispersed as smaller crystals in the liquors of

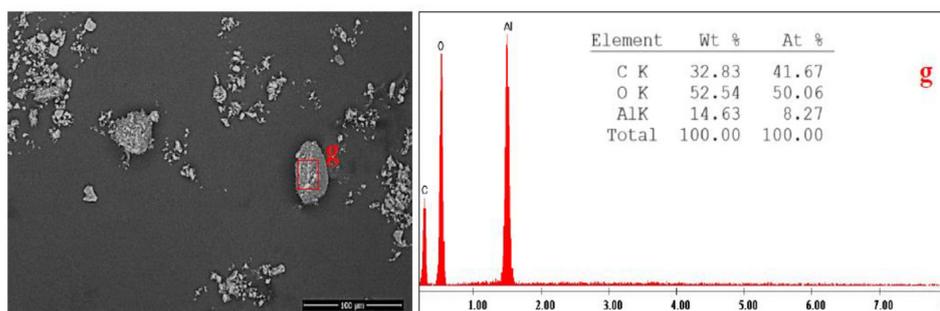


Fig. 3. SEM image of a pure  $\text{Al}(\text{OH})_3$  particle from class ATH < 10  $\mu\text{m}$

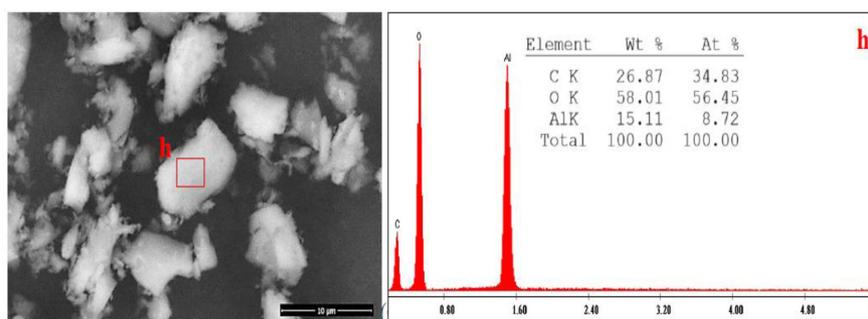


Fig. 4. SEM image of a pure  $\text{Al}(\text{OH})_3$  particle from class ATH < 20  $\mu\text{m}$

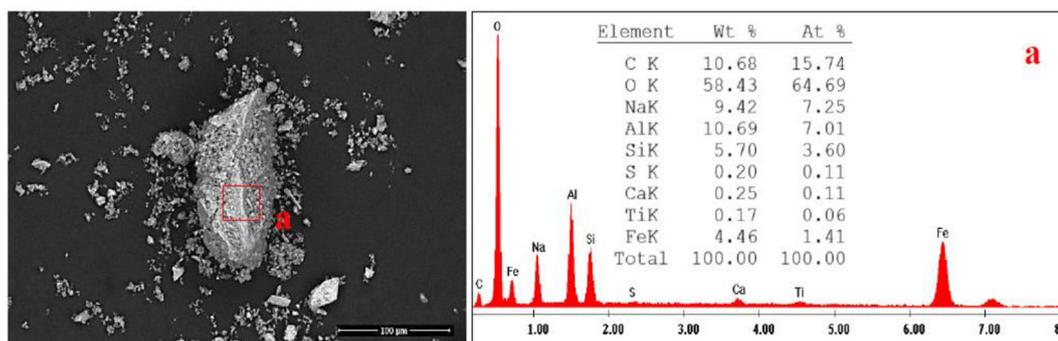


Fig. 5. Morphology of a particle of sodalite from bauxite residue investigated by diffraction EDS on a surface of  $10 \mu\text{m}^2$ , magnification 1.000x; SEM image of a well crystallized sodalite particle (new born phase) with  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  inclusions and contaminated with S (as sulphate), and occluded with calcium and titanium compounds

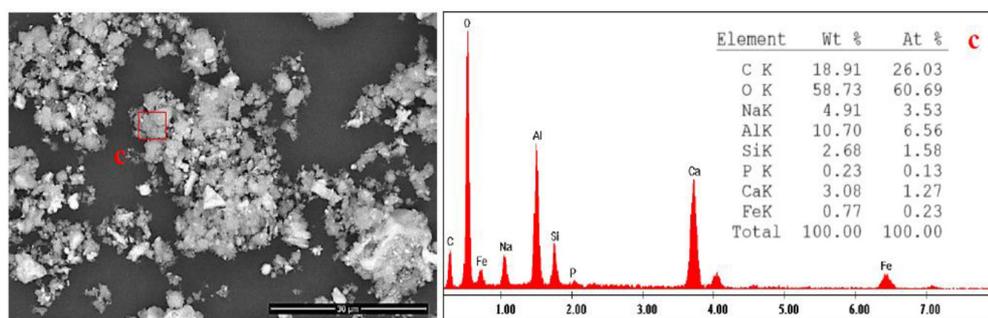


Fig. 6. Morphology of a particle of mixed sodalite and katoite agglomerate from bauxite residue investigated by diffraction EDS on a surface of  $2 \mu\text{m}^2$ , magnification 10.000x; SEM image of the incompletely crystallized cancrinite and sodalite agglomerates

different origins. In the Fig. 5 is visualized a large (100 microns) well mechanical stabilized crystal of sodalite (born in Bayer concentrated liquors during the bauxite digestion), surrounded by small crystalline or non-crystalline agglomerated small particles. The larger crystal itself is not a contaminating phase, because it has little chance to travel through the clarification and Bayer liquor filtration stages. But the particle hundreds of time smaller have the opportunity to overpass the control filter and to be occluded in the aluminium hydroxide particles, during growth and agglomeration stages. Actually, most of the smaller particles around the sodalite big crystal are, also, particles of sodalite contaminated with Ca,  $\text{TiO}_2$  and S (sulphate) as soluble or insoluble salts and occluded by  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

In the Fig. 6 there is presented another kind of agglomerated particles containing sodalite and katoite. Both of these phases are born in the digestion stage of bauxite, which was processed with some CaO adding for increasing stability of the agglomerated particle. Similar associations with variable calcium content were found often in the bauxite residue left after Sierra Leone bauxite digestion process. But in this case (Fig. 6), the agglomerated particle structure seems to be more fragile. Probably, the agglomeration of the smallest particles is an unfinished process, or katoite crystallization did not reach its final stages. This is why particles like those in the Fig. 6 are active sources of material for occlusion of the aluminium hydrate in Bayer production line. A strange association of particles can be seen in the Fig. 7. Here a particle of aluminogothite or aluminohematite (from bauxite) is covered

with a layer of sodalite (born during, bauxite digestion process). This kind of particles are not sources of material for occlusion, because at the dimensions and mechanical stability, seen in the Fig. 7, its particle is captured in Bayer concentrate liquor filter cake.

Figures 8 and 9 are good examples of aluminium hydroxide particle heavy contamination with the silicon (as silicon dioxide) and iron (as alumino-goethite or alumino-hematite) (Fig. 8) and with

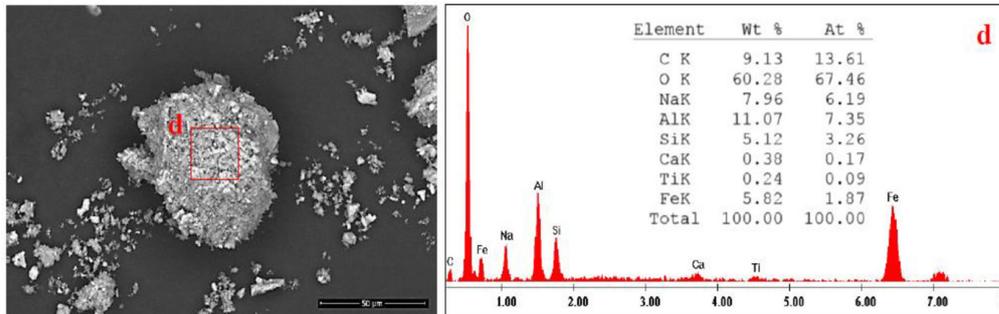


Fig. 7. Morphology of a large agglomerate of sodalite from bauxite residue and other impurities investigated by diffraction EDS on a surface of  $20\mu\text{m}^2$ , magnification 2.000x; SEM image of incompletely crystallized cancrinite and sodalite in a large agglomerates

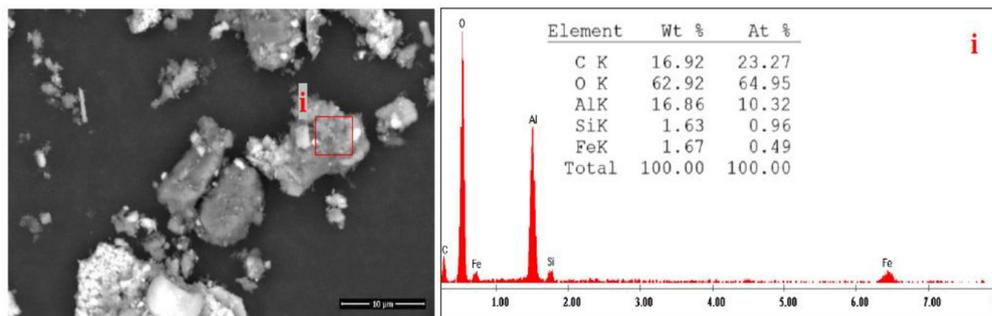


Fig. 8. Morphology of a small particle of aluminium hydroxide from fraction 0–45  $\mu\text{m}$  investigated by diffraction EDS on a surface of  $4\mu\text{m}^2$ , magnification 8.000x; SEM image of an occluded  $\text{Al}(\text{OH})_3$  particle with  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  and  $\text{SiO}_2$

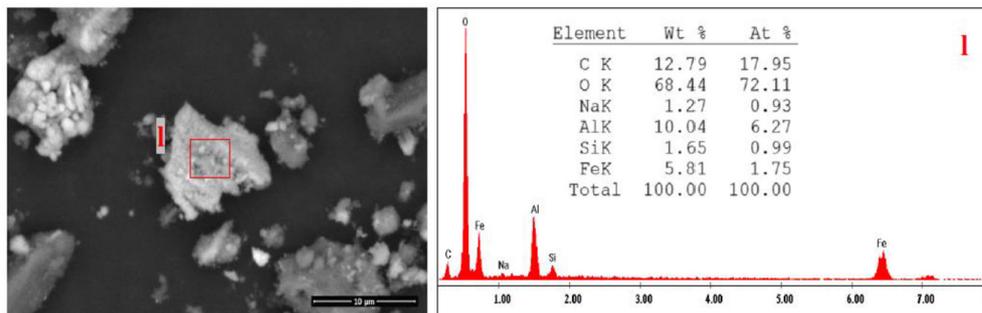


Fig. 9. Morphology of a small particle of aluminium hydroxide from fraction 0–45  $\mu\text{m}$  investigated by diffraction EDS on a surface of  $2\mu\text{m}^2$ , magnification 10.000x; SEM image of a contaminated  $\text{Al}(\text{OH})_3$  particle occluded after the breakage of sodalite particles in the presence of iron from alumino-goethite or alumino-hematite

residuals from the breakage of sodalite particles (Fig. 9). According to the above figures, it should be concluded that the new born phases in bauxite digestion process with perturbed lattices or as disordered crystals are active precursors for the impurities occlusion in aluminium hydroxide particles in any stage of sodium aluminate decomposition process in Bayer technology.

#### 4. Conclusions

Some of the properties of processed bauxite have a major importance in the transfer of heavy metals in liquors and in bauxite residue. Of these, the most important are: a) Crystallinity and the degree of crystallinity of all mineralogical phases in bauxite (including minor phases with heavy metal content); b) The weight percent of the amorphous phase, the distribution of the particle size in the digestion phase; c) Temperature in the digestion stage, fluctuation intervals of the major components concentration in the liquors during digestion; d) Operating parameters in the predesilication stage and the crystallinity of the new born DSP in this stage, and the crystallinity of other new or old natural phases; e) Efficiency of the concentrated liquors clarification additives; f) fineness and activity/efficiency of TCA in the filtering stage of the concentrated liquors.

#### 5. Acknowledgement

This study was made possible by implementation of the «Endow the research and Development of SC ALUM SA with independent and efficient research facilities to support the economic competitiveness and business development» project, co-funded by the European Regional Development Fund through the Competitiveness Operational Program 2014–2020. Under this project were purchased and commissioned: «Independent equipment/Installation for research and development of the technology of wet aluminium hydroxide classification», «Independent equipment/Installation for research and development of technology to obtain the dried aluminium hydroxide» and «Independent equipment/Installation for research and development of the technology of grinding and screening the dried aluminium hydroxide».

#### References

- [1] Dobra G., Filipescu L., Anghelovici N., Alistarh V., Iliev S. *Bauxite residue safety disposal and friendly environmental processing permanent care at Vimetco Alum SA Tulcea*, Bauxite Residue Valorisation and Best Practices Conference, Leuven 2015, 47–52.
- [2] Dobra G., Kiselev A., Filipescu L., Alistarh V., Anghelovici N., Iliev S. Full analysis of Sierra Leone bauxite and possibilities of bauxite residue filtration. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. Technol.*, 2016, 9(5), 643–656.
- [3] Dobra G., Filipescu L., Anghelovici N., Alistarh V., Iliev S., Cotet L. Bauxite residue safety disposal and possibilities to further utilization. Part 1. Acid soils remediation, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. Technol.*, 2017, 10(1), 6–21.
- [4] Cui Y., Chen J., Zhang Y., Peng D., Hung T., Sun C. *pH-Dependent Leaching Characteristics of Major and Toxic Elements from Red Mud*, *Int J. Environ Res Public Health* 2019, 16(11): 2046, DOI: 10.3390/ijerph16112046
- [5] Niculescu M., Ionita A.D., Filipescu L. Chromium Adsorption on Neutralized Red Mud, *Rev. Chimie (Bucuresti)* 2010, 61(2), 200–205.

[6] Niculescu M., Ionita A.D., Simion D., Crudu M., Filipescu L. Red mud – new material for tannery residual chromium binding, *UPB Sci. Bull. Series Chemistry* 2010, 72 (3), 99–114.

[7] Rubinos D.A., Barral M.T. Fractionation and mobility of metals in bauxite red mud, *Environmental Science and Pollution Research* January 2013, DOI: 10.1007/s11356–013–1477–1474.

[8] Micó C., Peris M., Sánchez J., Recatalá L. Heavy metal content of agricultural soils in a Mediterranean semiarid area: the Segura River Valley (Alicante, Spain), *Spanish Journal of Agricultural Research* 2006, 4(4), 363–372.

[9] Tóth G., Hermann T., Da Silva M.R., Montanarella L. Heavy metals in agricultural soils of the European Union with implications for food safety, *Environment International* 2016, 88, 299–309.

[10] Dobra G., Iliev S., Anghelovici N., Cotet L., Filipescu L. Impurities accumulation on the surface of alumina hydrate particles in Bayer technology, *Rev Chimie (Bucharest)* 2019, 70 (2), 355–360.

[11] Vind J., Alexandri A., Vassiliadu W., Pantias D. Distribution of Selected Trace Elements in the Bayer Process, *Metals* 2018, 8(5), 32.

[12] Éimear A., Deady E.A., Mouchos E., Goodenough E., Williamson B.J., Wall F. *A review of the potential for rare-earth element resources from European red muds: examples from Seydişehir, Turkey and Parnassus-Giona, Greece.*

DOI: 10.17516/1999-494X-0297

УДК 669.21

## Research on Hydrometallurgical Processing of Gold-Concentrate of Jamgyr Deposit

**Lyutsiya M. Karimova\***,  
**Dmitry V. Zakharyan and Yaroslav E. Agapitov**  
*LLP “KazHydroMed”*  
*Karaganda, Republic of Kazakhstan*

Received 15.12.2020, received in revised form 12.02.2021, accepted 21.03.2021

**Abstract.** Laboratory studies have been carried out on the processing of gold-bearing concentrate from the “Jamgyr” deposit using the JIN CHAN reagent. The influence of the concentration JIN CHAN, the duration of leaching, the temperature of the solution were studied. As a result of research, the extraction of gold and silver into solution using cyanide-free technology was 97,5% and 96%, respectively. The processing of the obtained solutions by the method of sorption was carried out on the MA940BG (gold) ion-exchange resin with the extraction of target components from the solution into the ion-exchange resin: Au – 100,0%, Ag – 77,5%.

**Keywords:** gold, concentrate, leaching, ecological reagent, sorption.

Citation: Karimova L.M., Zakharyan D.V., Agapitov Ya.E. Research on hydrometallurgical processing of gold-concentrate of jamgyr deposit, J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2021, 14(2), 166-174. DOI: 10.17516/1999-494X-0297

## Исследования по гидрометаллургической переработке золотосодержащего концентрата месторождения «Джамгыр»

**Л.М. Каримова, Д.В. Захарьян, Я.Е. Агапитов**  
*ТОО «КазГидроМедь»*  
*Республика Казахстан, Караганда*

**Аннотация.** Проведены лабораторные исследования по переработке золотосодержащего концентрата месторождения «Джамгыр» с помощью реагента JIN CHAN (Цинь Чань). Изучено влияние концентрации JIN CHAN, продолжительность выщелачивания, температура раствора. В результате исследований извлечение золота и серебра в раствор по бесцианидной технологии

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

\* Corresponding author E-mail address: lutsia.08@mail.ru

составило 97,5 и 96 % соответственно. Переработку полученных растворов методом сорбции проводили на ионообменной смоле МА940BG (gold), извлечение целевых компонентов из раствора в ионообменную смолу составило: Au – 100,0 %, Ag – 77,5 %.

**Ключевые слова:** золото, концентрат, выщелачивание, экологический реагент, сорбция.

Цитирование: Каримова, Л.М. Исследования по гидрометаллургической переработке золотосодержащего концентрата месторождения «Джамгыр» / Л.М. Каримова, Д.В. Захарьян, Я.Е. Агапитов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2021, 14(2). С. 166-174. DOI: 10.17516/1999-494X-0297

## Введение

Основным реагентом в гидрометаллургии получения золота и серебра из руд является цианид натрия, который применяется уже более 100 лет. Цианистый процесс обеспечивает извлечение порядка 80–90 % золота и серебра. Этот способ обладает существенными технологическими и экономическими преимуществами по сравнению с прочими металлургическими технологиями [1, 2].

Однако цианид относится к категории сильнодействующих ядовитых веществ, и его применение сопровождается большим объемом комплексных мероприятий: обеспечение безопасности обслуживающего персонала, обезвреживание цианидов в хвостах, экологические требования при складировании отходов цианирования. Это все дополнительные затраты, ухудшающие экономику процесса [3–8].

В связи с этим ведутся интенсивные работы по изучению возможностей замены цианидов другими альтернативными растворителями. В настоящее время известны альтернативные выщелачивающие системы, способные переводить золото и серебро в растворимое состояние. Наиболее известны из них тиомочевина, тиосульфаты натрия и аммония, галоиды (хлор, бром, йод) [5–9]. Тем не менее ни один из технологических вариантов с использованием нецианистых растворителей золота и серебра пока не может претендовать на роль универсального гидрометаллургического процесса, каковым в настоящее время является цианирование [3, 10].

Опубликована информация, что в Китае запатентован новый экологически чистый реагент для выщелачивания золота и серебра без цианида. Реагент представляет собой химическую смесь, состоящую из натриевой соли, полимеризованного цианамида натрия, щелочного тиокарбамида и стабилизатора. Он изготовлен из обычных химических материалов, таких как мочевина, каустическая сода, карбонат натрия и сульфид натрия, смешанных с подходящим катализатором [10, 11].

Многочисленными исследованиями установлено, что растворение золота в цианистых растворах в присутствии кислорода протекает по следующей реакции:



золотоцианистый натрий диссоциирует на ионы:



Таким образом, золото в растворе находится в составе комплексного цианистого иона  $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ . Согласно современным представлениям процесс растворения золота в цианистых растворах электрохимический и подчиняется общим закономерностям электрохимической коррозии металлов [12, 13].

Важным предметом и направлением исследований в горнодобывающей и металлургической сфере является поиск нового выщелачивающего средства для золота вместо высокотоксичного цианида [2, 10, 11].

В целях разработки промышленной безопасной технологии выщелачивания золота и серебра с помощью экологически чистого выщелачивающего препарата вместо традиционного цианирования были изучены факторы, влияющие на процесс выщелачивания с помощью реагента JIN SHAN («Цзинь Чань»).

Реагент марки JIN SHAN – экологически чистый заменитель цианида, предназначен для ускорения процесса выщелачивания золота и серебра из руд и концентратов с большим содержанием серы, мышьяковистых, сернистых и окисленных руд и связывания металла в пульпе.

### Экспериментальная часть

Для проведения исследований по выщелачиванию использовали концентрат из месторождения «Джамгыр» (Казахстан), его химический состав приведен в табл. 1.

Таблица 1. Содержание основных компонентов в черновом концентрате

Table 1. Content of main components in rough concentrate

Компоненты	Содержание, %	Компоненты	Содержание, %
Аu, г/т	62,2	Pb	0,25
Ag, г/т	51,41	As, г/т	93,86
Cu	0,11	Al	8,07
Fe	1,58	Si	26,4
Zn	0,039	S	1,43

Исследования проводили в термостатированном реакторе марки «Minni-50-1» с перемешиванием (170 об/мин), изучали влияние концентрации реагента JIN SHAN в интервале от 3,3 до 46,66 г/дм<sup>3</sup>, продолжительности выщелачивания 1–5 ч и температуры раствора 30–50 °С при отношении Ж:Т-3:1, в раствор вводили Са О.

### Результаты и их обсуждение

Условия и полученные результаты по влиянию концентрации реагента JIN SHAN, продолжительности и температуры выщелачивания на извлечение золота, серебра и меди в раствор представлены в табл. 2.

Как демонстрируют данные рис. 1, концентрация реагента оказывает определенное влияние на извлечение компонентов в раствор.

При малой концентрации 3,3 г/дм<sup>3</sup> извлечение золота и серебра составило 93,5, 93,14 % соответственно. Вероятно, нехватка выщелачивающего агента приводит к образованию поверхностных пленок, затрудняющих доступ к непрореагировавшим частицам.

Таблица 2. Зависимость влияния концентрации реагента JIN CHAN, продолжительности и температуры выщелачивания на извлечение золота, серебра и меди в раствор

Table 2. Dependence of the influence of the concentration of the reagent JIN CHAN, the duration and temperature of leaching on the extraction of gold, silver and copper into solution

Изучаемый фактор Условия проведения эксперимента	Выход кека, %	$\beta_{Au}$ , г/г в кеке	$\beta_{Ag}$ , г/г в кеке	$\beta_{Cu}$ , % в кеке	$\beta_{Fe}$ , % в кеке	$\beta_{Zn}$ , % в кеке	$\beta_{Pb}$ , % в кеке	$\beta_{Al}$ , % в кеке	$\beta_{As}$ , г/г в кеке	$\varepsilon_{Au}$ , %	$\varepsilon_{Ag}$ , %	$\varepsilon_{Cu}$ , %
$C_{JIN\ CHAN}$ , г/дм <sup>3</sup> ( $\tau$ – 5 ч, $t$ – 40 °С, Ж:Т=3,5:1)	3,3	4,08	3,56	1,52	1,52	0,037	0,26	8,39	64,79	93,51	93,14	0
	6,7	3,04	2,59	1,54	1,54	0,038	0,26	8,19	77,23	95,18	95,032	0
	10	2,6	2,12	0,080	1,76	0,039	0,29	8,35	78,05	95,94	96,00	29,31
	13,3	2,32	1,97	0,082	1,84	0,042	0,304	9,07	84,21	96,322	96,22	26,5
	20	2,44	2,45	0,079	1,815	0,041	0,295	8,84	75,58	96,17	95,35	29,91
	33,33	3,01	2,48	0,076	1,838	0,039	0,290	8,95	76,61	95,27	95,28	32,43
	40	2,04	1,40	0,076	1,823	0,039	0,291	8,82	73,03	96,83	97,34	33,26
	46,66	2,65	0,66	0,083	1,990	0,042	0,285	9,12	76,56	96,012	98,80	29,37
	5	2,44	2,45	0,079	1,815	0,041	0,295	8,84	75,58	96,17	95,35	29,91
	4	2,07	1,38	0,076	1,728	0,038	0,264	9,01	77,58	96,74	97,37	32,43
$\tau$ , часы ( $C_{JIN\ CHAN}$ , 20 г/дм <sup>3</sup> ; $t$ – 40 °С, Ж:Т=3,5:1)	3	1,92	1,53	0,085	1,770	0,043	0,272	8,99	80,42	97,05	97,16	26,28
	2	2,72	1,81	0,080	1,721	0,039	0,273	8,87	80,45	95,66	96,50	27,85
	1	4,15	1,61	0,081	1,726	0,039	0,274	9,02	86,37	93,42	96,91	27,39
	30	1,94	1,63	0,08	1,744	0,040	0,272	8,79	73,81	97,062	97,013	31,49
$t$ , °С ( $C_{JIN\ CHAN}$ , 20 г/дм <sup>3</sup> ; $\tau$ – 5 ч, Ж:Т=3,5:1)	40	2,44	2,45	0,079	1,815	0,041	0,295	8,84	75,58	96,17	96,35	29,91
	50	2,19	1,22	0,082	1,793	0,042	0,264	8,88	72,76	96,85	97,88	33,36

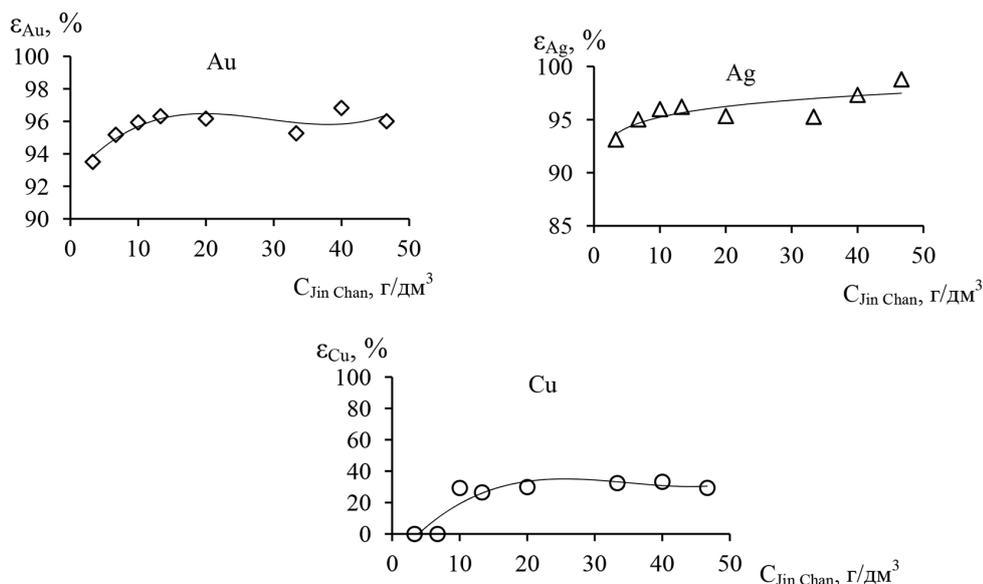


Рис. 1. Влияние концентрации реагента JIN CHAN на извлечение золота, серебра и меди в раствор

Fig. 1. Effect of the concentration of the JIN CHAN reagent for the extraction of gold, silver and copper into solution

Концентрация реагента более  $5 \text{ г/дм}^3$  приводит к повышению показателей извлечения. Дальнейшее повышение концентрации реагента не оказывает влияние на извлечение золота и серебра. В результате экспериментов определена оптимальная концентрация реагента JIN CHAN –  $10\text{--}12 \text{ г/дм}^3$ , при этом извлечение компонентов в раствор составило: Au –  $96,0 \%$ ; Ag –  $96,0 \%$ ; Cu –  $29,31 \%$ .

Изучено влияние температуры раствора в интервале  $30\text{--}50 \text{ }^\circ\text{C}$  на извлечение ценных компонентов в следующих условиях:

- концентрация реагента JIN CHAN –  $20 \text{ г/дм}^3$ ;
- отношение Ж:Т=3:1;
- продолжительность выщелачивания – 5 ч.

Графики частных зависимостей влияния температуры раствора ( $t, \text{ }^\circ\text{C}$ ) на извлечение золота (а), серебра (б) и меди (в) в раствор представлены на рис. 2 и в табл. 2.

Из литературных источников известно [5], что при цианировании повышение температуры имеет двойное воздействие: с одной стороны, интенсивность растворения золота несколько возрастает за счет повышения скорости химического взаимодействия и в некоторой степени увеличения скорости диффузии реагентов, с другой – также увеличивается скорость протекания побочных реакций, что ведет к загрязнению раствора и перерасходу реагента. В свою очередь, снижается растворение кислорода в растворе, что вызывает разложение цианидов. По-видимому, эти особенности проявляются и в данном случае.

С ростом температуры от  $30$  до  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  извлечение золота, серебра в раствор увеличивается, что обусловлено увеличением скорости диффузии. При этом извлечение ценных компонентов в исследуемом интервале повышается: Au –  $97,0 \%$ ; Ag –  $97,0 \%$ ; Cu –  $31,4 \%$ .

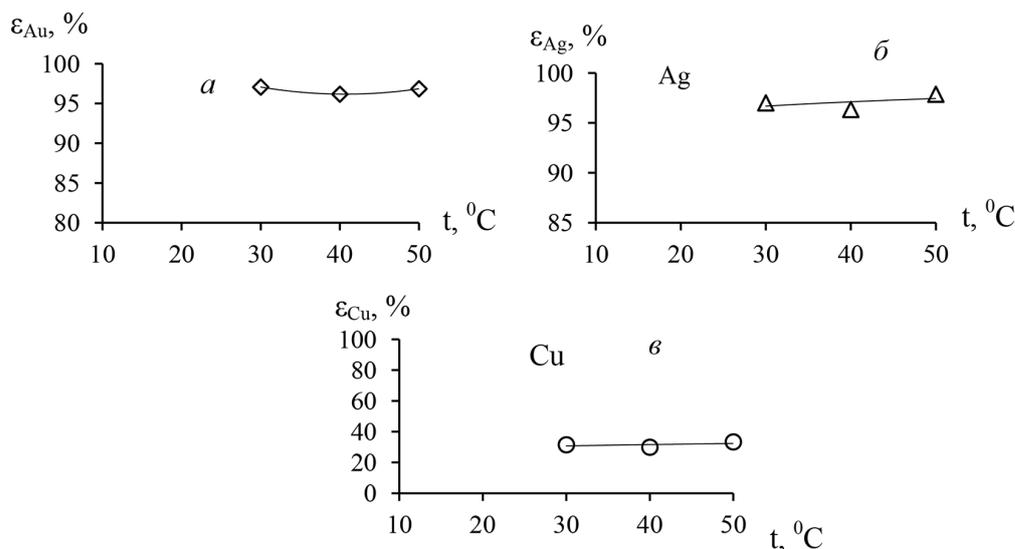


Рис. 2. Зависимости влияния температуры раствора на извлечение золота (а), серебра (б) и меди (в) в раствор

Fig. 2. Dependences of the influence of the temperature of the solution for the extraction of gold (a), silver (б) and copper (в) into solution

Влияние продолжительности выщелачивания изучено в интервале от 1 до 5 ч на извлечение золота, серебра и меди в раствор при следующих условиях:

- отношение Ж:Т=3:1;
- температура (t) 40 °C;
- концентрация реагента JIN CHAN 20 г/дм<sup>3</sup>.

Результаты проведенных исследований представлены в табл. 2 и на рис. 3.

Результаты экспериментов (табл. 2) показывают, что с увеличением продолжительности выщелачивания с 1 до 3 ч извлечение ценных компонентов возрастает и далее практически не меняется. Таким образом, наибольшая скорость и полнота растворения золота и серебра достигается при продолжительности 3 ч; большая скорость растворения серебра в начальный момент (первые 2–3 ч) объясняется взаимодействием реагента JIN CHAN с минералом, в котором содержится почти 50 % всего серебра, находящегося в концентрате.

Аналогично проведены исследования по выщелачиванию золота и серебра из концентрата «Джамгыр» с использованием цианида натрия. Исследования проводили при следующих условиях:

- отношение Ж:Т=3:1;
- температура (t) 40 °C;
- продолжительность 4 ч.

Концентрацию цианида натрия задавали в интервале 3,3 и 6,7 г/дм<sup>3</sup>.

Условия и полученные результаты представлены в табл. 3.

Согласно полученным данным, выщелачивание с использованием реагента JIN CHAN обеспечивает сопоставимые с процессом цианирования значения извлечения золота и серебра

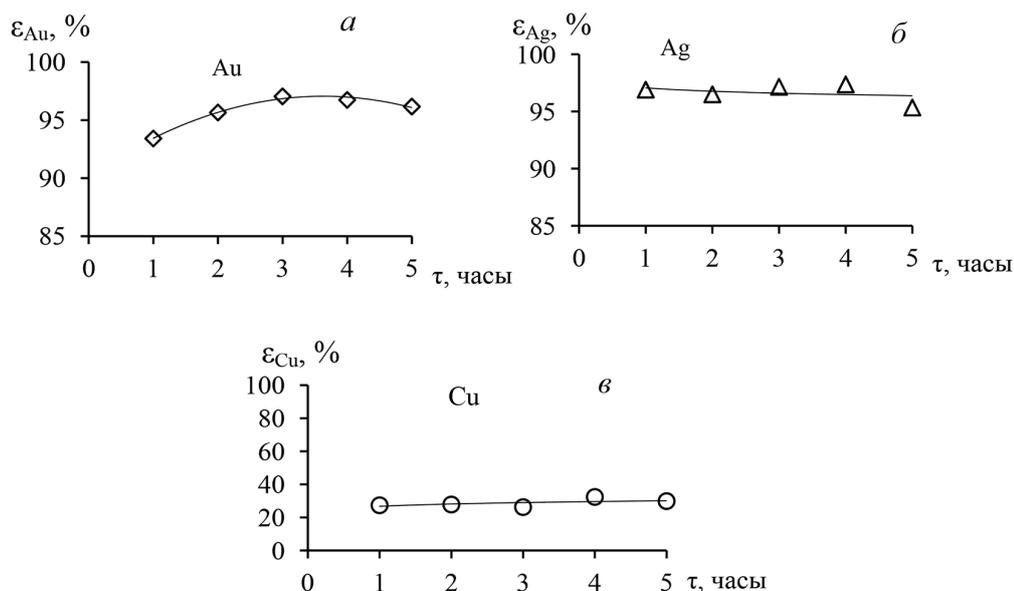


Рис. 3. Зависимости по влиянию продолжительности выщелачивания на извлечение золота (а), серебра (б) и меди (в) в раствор

Fig. 3. Dependences on the effect of leaching duration on the extraction of gold (a), silver (б) and copper (в) into solution

Таблица 3. Зависимость извлечения золота, серебра и меди в раствор от концентрации цианистого натрия

Table 3. Dependence of the extraction of gold, silver and copper into solution on the concentration of sodium cyanide

C <sub>NaCN</sub>	Выход кека, %	Содержание в кеке							ε <sub>Au</sub> , %	ε <sub>Ag</sub> , %	ε <sub>Cu</sub> , %
		β <sub>Au</sub> , г/т	β <sub>Ag</sub> , г/т	β <sub>Cu</sub> , %	β <sub>Fe</sub> , %	β <sub>Zn</sub> , %	β <sub>Pb</sub> , %	β <sub>Al</sub> , %			
3,3	99,0	3,92	2,7	0,079	1,67	0,036	0,253	8,85	93,76	94,8	28,9
6,7	99,0	4,3	1,8	0,075	1,53	0,047	0,240	8,53	93,15	96,53	32,5

в раствор. По золоту, с учетом максимальной положительной погрешности, извлечение составляет не менее 97,5 %. Указанное позволяет рекомендовать данный реагент для использования в процессах извлечения золота и серебра из концентрата месторождения «Джамгыр».

Сорбционное извлечение золота и серебра из раствора выщелачивания проводили на ионообменной смоле МА940BG (gold).

Сорбционный каскад представляет собой две последовательно соединенные колонки (1-я – на насыщение; 2-я – на прокок) в следующих условиях:

- удельный объем сорбционной колонны – 0,18 дм<sup>3</sup>;
- скорость сорбции – 7,5 уд. об/ч или 1,35 дм<sup>3</sup>/ч;
- направление продуктивного раствора снизу-вверх;
- температура комнатная.

Для контроля степени насыщения ионита в процессе сорбции каждый час проводился отбор проб раствора после прохождения каскада.

После окончания процесса сорбции в каскад дозирующим насосом подавалась вода для промывки ионообменной смолы.

Водная промывка проводилась в следующих условиях:

- скорость промывки – 7,5 уд. об/ч или 1,35 дм<sup>3</sup>/ч;
- объем промывной воды – 4 уд. об или 0,72 дм<sup>3</sup>;
- температура комнатная.

После водной промывки из 1-й колонны каскада было отобрано 10 см<sup>3</sup> смолы для проведения химического анализа.

Насыщенный сорбент направляли на десорбцию золота и серебра серноокислым раствором тиомочевин [14, 15].

На основании полученных данных в процессе сорбции извлечение целевых компонентов из раствора в ионообменную смолу составило: Au – 100,0 %, Ag – 77,5 %.

### Заключение

Проведены лабораторные исследования по переработке золотосодержащего концентрата месторождения «Джамгыр». Изучали влияние концентрации реагента JIN SHAN в интервале от 3,3 до 46,66 г/дм<sup>3</sup>; продолжительность выщелачивания – от 1 до 5 ч; температура раствора 30–50 °С. В результате проведенных экспериментов достигнуты показатели по извлечению в раствор по бесцианидной технологии:

- Au – 97,5 %;
- Ag – 96,0 %.

Переработка полученных растворов методом сорбции на активированный уголь или ионообменную смолу позволит получить сплав Доре с извлечением золота и серебра не менее 95 % для последующего аффинажа.

### Список литературы / References

- [1] Лодейшиков В.В. *Извлечение золота из упорных руд и концентратов*. М.: Недра, 1968. 204 с. [Lodeyshchikov V. V. *Extraction of gold from refractory ores and concentrates*. Moscow, Nedra, 1968. 204 p. (in Russian)]
- [2] Верхоzin С.С. Новые нецианистые реагенты для выщелачивания золота производства КНР. *Золотодобыча*, 2016, 215. <https://zolotodb.ru/article/11540> [Verkhozin S.S. New Non-Cyanide Reagents For Leaching Gold Produced In China. *Zolotodobycha*, 2016, 215. <https://zolotodb.ru/article/11540> (in Russian)]
- [3] Барченков В.В., Кудияров Н.Ю. Опыт применения в Китае нецианистого реагента Flotent Gold SC570 для выщелачивания золота из руд. *Золотодобыча*, 2016, 215. <https://zolotodb.ru/article/11546>. [Barchenkov V. V., Kudiyarov N. Yu. Experience of using non-cyanide reagent Flotent Gold SC570 for leaching gold from ores in China. *Gold mining*, 2016, 215. <https://zolotodb.ru/article/11546> (in Russian)]
- [4] Хуан Лихуан. *Техника добычи золота и серебра*. Пекин: Metallургическая промышленность, 2009. [Huang Lihuang. *Gold and silver mining technique*. Beijing, Metallurgical Industry Press, 2009 (in Russian)]
- [5] Guangxi Senhe High Technology Co., L., 30/10/2018. Jinchan gold ore dressing agent, leaching reagent, sodium cyanide replacement, s. 1. [https://jinchan.en.ecplaza.net/products/jinchan-gold-ore-dressing-agentleaching-reagentsodium\\_4092507](https://jinchan.en.ecplaza.net/products/jinchan-gold-ore-dressing-agentleaching-reagentsodium_4092507)

- [6] Aylmore M.G. and Muir D.M. Thiosulfate leaching of gold—a review. *Minerals Engineering*, 2001, 14(2), 135–174.
- [7] Breuer P. and Jeffrey. Thiosulfate leaching kinetics of gold in the presence of copper and ammonia. *Minerals Engineering*, 13(10), 1071–1081.
- [8] Grosse A.C., Dicoski G.W., Shaw M.J. and Haddad P.R. Leaching and recovery of gold using ammoniacal thiosulfate leach liquors (a review). *Hydrometallurgy*, 2003, 69(1), 1–21.
- [9] Ha V.H., Lee J.-c., Jeong J., Hai H.T. and Jha M.K. Thiosulfate leaching of gold from waste mobile phones. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 178(1), 1115–1119.
- [10] Lu Chaofei, Dan Xiaoye, Yun Yaxin, Ju Yonghui, Zhang Tao, Wang Yibing, Que Xiaofeng, Kang Jihong. Extraction of gold from concentrates with the environmentally friendly Jin chan leaching agent. *Gold*, 2014 (5).
- [11] Beyuo M., Abaka-Wood G.B., Asamoah R.K., Kabenlah A. and Amankwah R.K. A Comparative Study of Sodium Cyanide and Jinchan TM Gold Leaching Reagents: A Case Study at Goldfields Ghana Limited. *4th UMaT Biennial International Mining and Mineral Conference*, 2016, pp. MR195–199.
- [12] Плаксин И. Н. *Металлургия благородных металлов*. М.: Metallurgizdat, 1958. 338 с. [Plaksin I. N. *Metallurgy of precious metals*. Moscow, Metallurgizdat, 1958. 338 p. (in Russian)].
- [13] Масленицкий И.Н., Чугаев Л.В. *Металлургия благородных металлов*. М.: Metallurgiya, 1972. 367 с. [Maslenitskiy I. N., Chugaev L. V. *Metallurgy of precious metals*. Moscow, Metallurgy, 1972. 367 p. (in Russian)].
- [14] Лодейщиков В.В., Игнатъев К. Д. *Рациональное использование серебросодержащих руд*. М.: Недра, 1973. 224 с. [Lodeyshchikov V. V., Ignatiev K. D. *Rational use of silver-bearing ores*. Moscow, Nedra, 1973. 224 p. (in Russian)]
- [15] Лодейщиков В. В. *Технология извлечения золота и серебра из упорных руд*. Иркутск: ОАО «Иргиредмет», 1999. 31 с. [Lodeyshchikov V. V. *Technology for the extraction of gold and silver from refractory ores*. Irkutsk, JSC «Irgiredmet», 1999. 31 p. (in Russian)]

DOI: 10.17516/1999-494X-0298

УДК 504.55.054:622(470.6)

## Physical and Chemical Technologies of Metal Mining and Water Resources

Vladimir I. Golik<sup>\*a,b</sup>, Maria Yu. Liskova<sup>c</sup>,  
Yadviga G. Nebylova<sup>d</sup> and Chainesh B. Kongar-Syuryun<sup>e</sup>

<sup>a</sup>*North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy  
Vladikavkaz, Russian Federation*

<sup>b</sup>*South-Russian State Polytechnic University  
Novocherkassk, Russian Federation*

<sup>c</sup>*National Research Polytechnic University  
Perm, Russian Federation*

<sup>d</sup>*Kuban State University  
Krasnodar, Russian Federation*

<sup>e</sup>*National Research Technological University "MISiS"  
Moscow, Russian Federation*

Received 24.11.2020, received in revised form 18.01.2021, accepted 12.03.2021

**Abstract.** The article is devoted to minimizing the negative impact of mining on the water resources of the mining regions. An assessment is made of leaching technologies with the involvement of non-conventional reserves for traditional methods of mining, reducing costs and lowering the level of environmental impact, including water resources. A reference is given on the use of leaching technologies for the development of natural and technogenic deposits in Russia. The mechanism of contamination of water resources with reagents and products of ore mining and processing is described. The typification of the processes of water migration of substances and components of underground leaching solutions is proposed. The zones of interaction between mineral deposits and water resources are differentiated. Fundamental differences of technology are formulated by the criterion of impact on water resources. An example of preventing the mixing of clean water and industrial effluents by creating a barrier in practice of a mining enterprise is given. It is concluded that the use of technologies with leaching of metals from ores at the place of their localization is promising.

**Keywords:** water resources, leaching technology, environment, reagent, industrial effluents, damage.

Citation: Golik V.I., Liskova M. Yu., Nebylova Ya. G., Kongar-Syuryun Ch. B. Physical and chemical technologies of metal mining and water resources, J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2021, 14(2), 175–186. DOI: 10.17516/1999–494X-0298

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

\* Corresponding author E-mail address: v.i.golik@mail.ru

ORCID: 0000-0002-1181-8452

## **Физико-химические технологии добычи металлов и водные ресурсы**

**В.И. Голик<sup>а,б</sup>, М. Ю. Лискова<sup>в</sup>,  
Я.Г. Небылова<sup>г</sup>, Ч. Б. Конгар-Сюрюн<sup>д</sup>**

*<sup>а</sup>Северо-Кавказский государственный технологический университет  
Российская Федерация, Владикавказ*

*<sup>б</sup>Южно-Российский государственный политехнический университет  
Российская Федерация, Новочеркасск*

*<sup>в</sup>Национальный исследовательский политехнический университет  
Российская Федерация, Пермь*

*<sup>г</sup>Кубанский государственный университет  
Российская Федерация, Краснодар*

*<sup>д</sup>Национальный исследовательский  
технологический университет «МИСиС»  
Российская Федерация, Москва*

**Аннотация.** Статья посвящена минимизации негативного воздействия горного производства на водные ресурсы добывающих регионов. Дана оценка технологий выщелачивания с вовлечением в эксплуатацию некондиционных для традиционных способов добычи запасов, уменьшением затрат и снижением уровня воздействия на окружающую среду, в том числе на водные ресурсы. Дана справка об использовании технологий выщелачивания в разработке природных и техногенных месторождений России. Описан механизм загрязнения водных ресурсов реагентами и продуктами добычи и переработки руд. Предложена типизация процессов водной миграции веществ и компонентов растворов подземного выщелачивания. Дифференцированы зоны взаимодействия месторождений полезных ископаемых с водными ресурсами. Сформулированы принципиальные различия технологии по критерию воздействия на водные ресурсы. Приведен пример предупреждения смешивания чистых вод и промышленных стоков путем создания барьера на практике добывающего предприятия. Сделан вывод о перспективности использования технологий с выщелачиванием металлов из руд на месте их локализации.

**Ключевые слова:** водные ресурсы, технология выщелачивания, окружающая среда, реагент, промышленные стоки, ущерб.

Цитирование: Голик, В. И. Физико-химические технологии добычи металлов и водные ресурсы / В. И. Голик, М. Ю. Лискова, Я. Г. Небылова, Ч. Б. Конгар-Сюрюн // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2021, 14(2). С. 175–186. DOI: 10.17516/1999–494X-0298

### **Введение**

Обладая крупнейшими запасами руд цветных металлов и добывая 5 % мирового минерального сырья в денежном выражении, Россия не обеспечивает свою сырьевую безопасность по ряду цветных металлов. Большая часть благородных металлов добывается попутно, а добыча редких металлов и рассеянных элементов практически не осуществляется. Недостаточность сырьевой базы для удовлетворения запросов промышленности формирует проблему модернизации технологий добычи цветных металлов, связанную с глобальными задачами обеспечения жизнедеятельности в условиях демографических явлений, снижения содержания металлов в рудах с глубиной горных работ, усложнения условий разработки и др. [1–4].

Одним из направлений решения проблемы является освоение некондиционных природных и техногенных месторождений инновационными физико-химическими технологиями с вовлечением в эксплуатацию непригодных для традиционных способов добычи руд, которые противопоставляются технологиям с обрушением, с твердеющей закладкой, с открытым выработанным пространством. Эти технологии имеют свою историю, освоены в промышленных масштабах и располагают хорошей перспективой развития [5–8].

Вместе с тем освоение физико-химических технологий рождает комплекс трудно решаемых вопросов взаимодействия с природными условиями существования биоты в экосистемах окружающей среды, в первую очередь в гидросфере как транспортирующей химические продукты новой технологии и связующей все экосистемы окружающей среды [9–12].

Физико-химические технологии разработки вступают в конфликт с живым веществом, изменяя условия существования водных ресурсов, поэтому согласование интересов горнопромышленных предприятий и принципов экологизации промышленного производства является целью исследований последнего времени и настоящей статьи [13–17].

### Результаты и обсуждение

Проблема сохранения водных ресурсов от технологического загрязнения исследуется на практике промышленно развитого Юга России, располагающего большими водными ресурсами.

Каспийское море питают реки Волга, Терек, Кума, Сулак, Самур, Калаус и несколько десятков мелких рек.

Азовское море – уникальный водоем площадью 38 тыс. км<sup>2</sup>, жизнь которого связана с рекой Дон, обеспечивающей 2/3 материкового стока. В пределах Юга России около 36 тыс. рек протяженностью почти 150 тыс. км. Только в Дагестане 6255 рек, большинство из которых имеют длину менее 10 км. 21 река впадает в море.

Дон – одна из крупнейших рек европейской части России. Длина его 1870 км, площадь водосбора 442 тыс. км<sup>2</sup>. К крупным рекам относится также Северский Донец. Средние реки Сал, Западный Маныч, Калитва. Малые и средние реки представлены 21 бассейном, включающим 165 рек суммарной длиной 9 565 км.

Кубань располагается в пониженной части предгорной равнины. Вдоль побережья Азовского моря расположены мелководные соленые заливы.

Каспийское море питают реки Волга, Терек, Кума, Сулак, Самур, Калаус и несколько десятков мелких рек. По насыщенности гидро-энергоресурсами выделяются реки Дагестана. Первенствует река Сулак, среднегодовой сток ее превышает 170 м<sup>3</sup>/с.

Озера округа насчитывают около 5 тыс. водоемов общей площадью почти 6 тыс. км<sup>2</sup>. Цимлянское водохранилище в пределах Ростовской и Волгоградской областей имеет площадь 2700 км<sup>2</sup>. Волгоградское водохранилище располагается в Волгоградской и Саратовской областях и имеет площадь 3117 км<sup>2</sup>, объем 31,5 км<sup>3</sup> и длину 540 км. Краснодарское водохранилище имеет площадь 400 км<sup>2</sup>, объем 2,3 км<sup>3</sup>, длину 40 км, наибольшую ширину 15 км и среднюю глубину 6 м.

Ледники в количестве более 1400 единиц общей площадью около 1 тыс. км<sup>2</sup> питают реки Кубань, Терек, Сулак, Самур и др.

Пресные воды в пределах Предкавказья и Ростовской области оцениваются в 100–110 км<sup>3</sup>. Запасы воды в ледниках 85 км<sup>3</sup>.

Металлические месторождения Юга России включают в себя широко известное Тырныаузское (Кабардино-Балкария) и Ктитебердинское (Карачаево-Черкесия) месторождения вольфрамомолибденовых руд, Садонское (Северная Осетия – Алания) свинцово-цинковых руд, Урупское месторождение меди (Карачаево-Черкесия), медные руды (Дагестан). Важнейшими ископаемыми рудной минерагении являются черные, цветные, благородные, редкие металлы и рассеянные элементы.

Урупский горно-металлургический комбинат эксплуатирует Урупское и Власенчихинское месторождения. Тырныаузский вольфрамомолибденовый комбинат обрабатывал Тырныаузское месторождение комбинированно: верхнюю часть карьерами «Высотный» и «Мукуланский», нижнюю – подземным рудником «Молибден». Садонский свинцово-цинковый комбинат располагает более 150 полиметаллическими месторождениями.

Эксплуатации месторождений присущи закономерности развития:

- увеличение объема добычи руд при уменьшении содержания металлов в руде;
- селективная выемка с деконцентрацией работ и оставлением целиков;
- разрушение массива с увеличением объема разубоживающих пород.

Хвосты переработки металлических руд хранятся на территориях добывающих регионов, активно воздействуя на водные ресурсы (рис. 1).

При разработке ряда природных и техногенных месторождений России получают развитие физико-химические технологии с использованием феномена выщелачивания металлов из вскрываемых руд (табл. 1).

Горные предприятия своей деятельностью нарушают природные процессы. Предприятия России извлекают на поверхность более 1,3 млрд м<sup>3</sup> сточных вод в год. В виде взвесей выбрасываются тысячи тонн комплексных руд. Рудничные воды содержат медь, железо, серу в концентрациях, соизмеримых с их содержанием в рудах, а концентрации цинка и кадмия превышают эти величины.

Горные объекты принимают слабоминерализованные воды и выдают на поверхность влияющие на прилегающие регионы высокоминерализованные воды: технологические хвосты

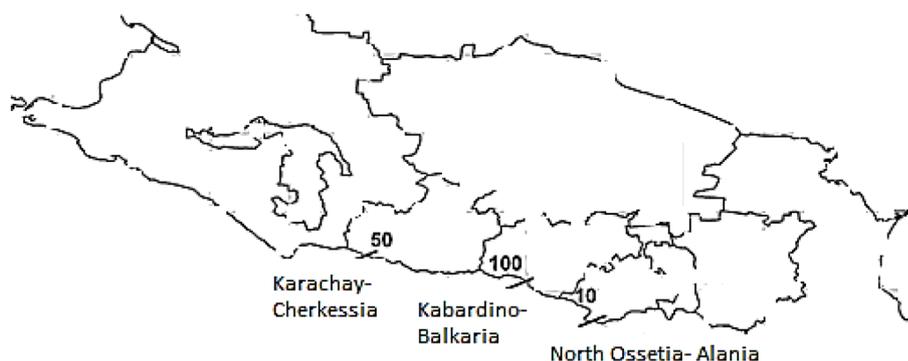


Рис. 1. Запасы техногенных месторождений, млн тонн

Fig. 1. Reserves of technogenic deposits, million tons

Таблица 1. Выщелачивание металлов на месторождениях России (2017 г.)

Table 1. Leaching of metals at Russian deposits (2017)

Металл	Месторождение, технология	Регион
Медь	Техногенные месторождения	Свердловская обл. Мурманская обл. Красноярский край
	Гумешевское, подземное выщелачивание	Свердловская обл.
Никель-кобальт	Аллареченское	Мурманская обл.
	Хвостохранилище № 1	Красноярский край
	Озеро Барьерное	
Цинк	Шлакоотвал	Свердловская обл.
Олово	Техногенные месторождения	-
Вольфрам	Барун-Нарынское	Бурятия
	Спокойнинское	Забайкальский край
Уран	Стрельцовское, подземное и кучное выщелачивание	Читинская обл.
Титан	Кручининское, скважинное	Забайкальский край

обогащения, сливы и фильтрат от сгущения и обезвоживания, шахтные стоки атмосферного и природного происхождения (рис. 2).

Составными частями промышленных сточных вод горнодобывающих предприятий являются шахтные воды, а также стоки атмосферных вод, загрязненные вследствие водной эрозии отвалов пород и некондиционного сырья.

При геотехнологических методах разработки воды используются для растворения, выщелачивания и транспортировки полезных ископаемых. К загрязнителям относятся химические ингредиенты, остающиеся в недрах, и водные отходы переработки выдаваемых на поверхность «рассолов».

Промышленные стоки, поступающие в технические водоемы – пруды, различного вида отстойники, – оказывают существенное влияние на статические запасы и гидродинамические режимы подземных вод.

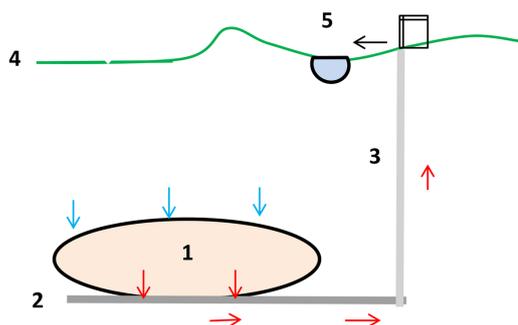


Рис. 2. Схема движения потоков: 1 – месторождение; 2 – приемник растворов; 3 – выдающая выработка; 4 – шахтная поверхность; 5 – река

Fig. 2. Flow pattern: 1 – field; 2 – solution receiver; 3 – outstanding output; 4 – shaft surface; 5 – river

Химико-минералогический состав месторождений непостоянен. При понижении уровня горных работ содержание металлов уменьшается, а отделенная от массива руда, не отвечающая условиям в рассматриваемый период времени, остается в пустотах, формируя техногенные месторождения потерянных руд.

Эти руды могут быть использованы для выщелачивания. Выщелачивание руд из вскрываемых металлов происходит вследствие сложных химических реакций нередко с образованием новых соединений, опасных для водных ресурсов региона.

Способ подземного выщелачивания реализуется путем подачи в выработанное пространство выщелачивающего раствора и выдачи продуктивного раствора на переработку.

Условиями отработки месторождения выщелачиванием служат предварительное водопонижение и осушение, а также поддержание шахтного водоотлива в период эксплуатации месторождения, которое является дренажной.

Рабочий раствор обычно представляет собою водный раствор серной кислоты, карбонатов и бикарбонатов. Поток рабочего раствора при движении по продуктивному горизонту охватывает не только рудное тело, но и вмещающие горные породы. Процесс протекает непрерывно в замкнутом цикле до тех пор, пока из недр не будет извлечен полезный компонент. По окончании процесса в продуктивном горизонте остается сложный по составу остаточный раствор. Вследствие многократного участия рабочего раствора его минерализация к концу отработки рудного тела достигает 60–80 г/л. Часть сульфат-иона в процессе взаимодействия выводится из раствора вследствие образования нерастворимых веществ, например гипса.

Роль рабочего органа выполняет жидкая фаза, содержащая растворенный реагент. Она же выносит из области взаимодействия продукты выщелачивания. Для рентабельной добычи продукции в обороте необходимо держать большой объем рабочих растворов. Концентрация полезного компонента в продуктивных растворах примерно в 25 раз меньше, чем начальное содержание его в руде. При подземном выщелачивании в недра вводится объем загрязнителей в виде сульфат-иона. Возможны и другие добавки, используемые в качестве окислителя: трехвалентное железо, хлор-ион, поверхностно-активные вещества и другие химикалии.

В недрах набор загрязнителей расширяется вследствие образования новых веществ при взаимодействии реагента с рудами, вмещающими породами и мобилизованным металлом.

Загрязнение поверхностных вод при подземном выщелачивании происходит как непосредственно, так и ветропылевым разносом, подземным стоком, дождевыми и талыми водами. В поверхностные воды попадают пыль, рудный шлам, сульфаты и гидроокислы, растворы ПВ и продукты их взаимодействия с породами.

При подземном выщелачивании загрязнению подвергаются надпродуктивные водоносные горизонты. В редких случаях – при наличии литологофильтрационных окон или гидравлически раскрытых тектонических нарушений – растворы ПВ попадают в подпродуктивный водоносный горизонт в местах и в периоды превышения пьезометрической поверхности продуктивного водоносного горизонта над пьезометрическим уровнем подпродуктивного. Загрязнение надпродуктивных водоносных горизонтов возможно и при нарушениях технологии строительства скважин в контуре выщелачивания.

Каналами связи продуктивного и надпродуктивного водоносных горизонтов могут являться некачественно ликвидированные скважины. При попадании растворов выщелачивания

в вышележащую толщу загрязнение может распространяться на значительное расстояние или локализуется технологическими мерами.

Продуктивный водоносный горизонт в пределах контура отработки загрязняется весьма существенно, а распространение загрязнений за контур отработки зависит от системы отработки и гидрологических условий локализации оруденения.

Взаимодействие подземных вод с вмещающими их горными породами является аналогом процесса выщелачивания слабой интенсивности. В подземных водах содержатся все компоненты растворов подземного выщелачивания.

Процессы водной миграции веществ делятся на три группы:

- химические: растворение, выщелачивание, сорбция, ионный обмен, образование осадка, окисление, восстановление;
- биохимические: результат жизнедеятельности микроорганизмов с синтезом и разложением вещества;
- физические: подвижность, концентрирование, испарение, рассеяние, смешение, диффузия, гравитационная дифференциация (табл. 2).

С увеличением глубины работ степень минерализации увеличивается, а состав упрощается и приближается к мономинеральному.

Подземная гидросфера представляет собой совокупность и чередование связанных между собой гидрогеологических структур, открытых на выступах фундамента и закрытых в депрессиях. Чем меньше гидрогеологическая структура в плане, тем больше она близка к поверхностным водам. В этом же направлении улучшаются условия фильтрации и промывания пород, что способствует формированию в приповерхностной части литосферы слабоминерализованных гидрокарбонатных подземных вод.

В районе месторождения полезных ископаемых в вертикальном разрезе возникают зоны:

- приповерхностная зона обитания живого вещества;
- промежуточная зона, отделяющая зону локализации от запасов сырья;
- глубинная зона локализации полезных ископаемых.

Таблица 2. Систематизация компонентов растворов подземного выщелачивания

Table 2. Systematization of the components of in situ leaching solutions

Группы	Компоненты	Процессы	Продукты
Сильные мигранты	$\text{Na}^+$ , $\text{Cl}^-$	Разбавление, обмен с комплексом поглощенных оснований, депонирование в пористости	Новообразования
Умеренные мигранты	$\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{NH}_4^+$ , $\text{K}^+$ , $\text{SO}_4^{2-}$ и др.	Химические реакции, сорбция, десорбция, биохимические процессы, автометаморфизм, окисление, восстановление, депонирование	Нерастворимые и слаборастворимые вещества, сульфатоемкие вещества, газы, биомасса
Слабые мигранты	$\text{Fe}^{3+}$ , $\text{Fe}^{2+}$ , $\text{Al}^{3+}$ и др.	Химические реакции, сорбция, десорбция, биохимические процессы, автометаморфизм, окисление, восстановление, депонирование, гидролиз	Нерастворимые и слаборастворимые вещества, сульфатоемкие вещества

Зона локализации представляет собой обводненный стратиграфический или литологический горизонт или комплекс, расположенный между водоупорами. Промежуточная зона состоит из стратиграфических или литологических горизонтов, среди которых могут быть и водоносные. Если промежуточная зона оказывается маломощной или отсутствует, месторождение располагается в зоне обитания.

Зона обитания включает почвы, породы зоны аэрации и грунтовых вод, грунтовые и поверхностные воды, приповерхностные части атмосферы, растительный и животный мир. Конгломераты, брекчии, метаморфические и изверженные породы обводнены – от мощных потоков грунтовых вод в долинах рек до заболоченностей. Широко развиты поверхностные воды – постоянные и временные водотоки, водоемы, болота, в которых в значительных количествах формируются донные осадки. Твердая и жидкая фазы пронизываются газовой фазой: воздушные газы растворены в поверхностных и грунтовых водах, насыщают породы зоны аэрации и почвы; сама атмосфера, особенно в приземной части, содержит компоненты литосферы, гидросферы и биосферы в виде аэрозолей, паров и бактерий.

Технологии разработки месторождений различаются местом извлечения металлов из руд. При традиционных технологиях разработки вся добытая горная масса извлекается на земную поверхность для переработки. Хвосты переработки размещаются в хранилищах, которые становятся зонами инфильтрации жидкой фазы в подстилающие породы и грунтовые воды.

Шахтные воды, извлеченные на поверхность, содержат вредности в мобильном состоянии в виде растворов и взвесей. Они попадают после очистки, а чаще без нее, в гидрографическую сеть. Активированный источник загрязнений влияет на зону обитания (рис. 3).

При отработке месторождений выщелачиванием ни руда, ни подземные воды из недр на поверхность не извлекаются, за исключением части руд при создании компенсационного пространства для разрыхляемых руд. Наоборот, в недра вводятся химически активные и биологически опасные вещества для перевода полезных компонентов в раствор (рис. 4).

Транспортировка добываемых продуктивных и рабочих растворов осуществляется с помощью трубопроводного транспорта в замкнутом пространстве. Главным объектом воздей-

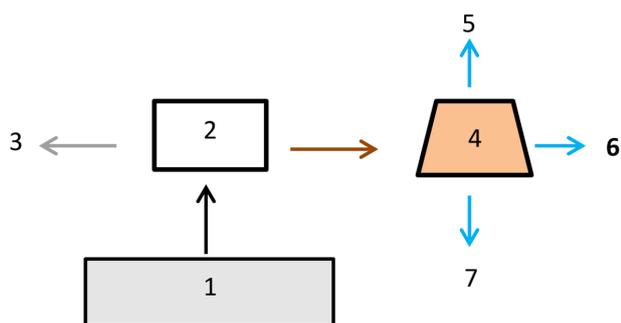


Рис. 3. Движение потоков при разработке традиционными способами: 1 – месторождение; 2 – цех переработки руд; 3 – концентрат; 4 – хранилище хвостов переработки; 5 – вода в атмосферу; 6 – вода в гидросферу; 7 – вода в литосферу

Fig. 3. The movement of flows during development by traditional methods: 1 – field; 2 – ore processing shop; 3 – concentrate; 4 – repository tailings repository; 5 – water to the atmosphere; 6 – water in the hydrosphere; 7 – water to the lithosphere

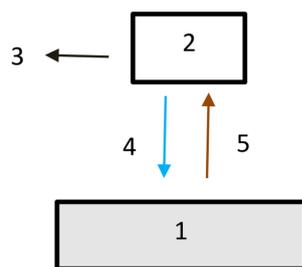


Рис. 4. Движение водных потоков при разработке выщелачиванием: 1 – месторождение; 2 – цех переработки растворов; 3 – концентрат; 4 – раствор реагента; 5 – производственный раствор

Fig. 4. The movement of water flows during development by leaching: 1 – field; 2 – solution processing workshop; 3 – concentrate; 4 – reagent solution; 5 – production solution

ствия процесса добычи металлов является не зона обитания, а зона локализации полезных ископаемых, где риск загрязнения поверхности, воздуха, вод может быть исключен.

Зона обитания и зона изоляции загрязняются в случае нарушения технологии добычи, переработки, хранения и транспортировки готового продукта и использования реагентов и материалов.

В недрах остаются растворы подземного выщелачивания с частью реагентов, продуктов реакций и хвостами выщелачивания, которые могут выйти за пределы контура отработки и продвигнуться по потоку на расстояние, обусловленное параметрами движения подземных вод.

Остаточные растворы могут проникнуть и в смежные водоносные горизонты при наличии с ними естественной или искусственной гидравлической связи, тектонических нарушений или при землетрясениях.

Предприятие подземного выщелачивания является аналогом полигонов подземного захоронения жидких промышленных стоков, отличаясь тем, что рудник выщелачивания строят в локализирующей месторождение геологической структуре, в то время как для полигонов подземного захоронения выбирают отвечающие определенным требованиям структуры.

Сравнение способов разработки месторождений показывает, что для водных ресурсов добываемого региона наиболее опасны традиционные технологии с образованием в земной коре выемкой руд полостей, служащих дренажем для поверхностных и подземных вод. Их фильтрация сквозь породы повышает минерализацию и делает опасными при выдаче вод на земную поверхность.

Технологии же с выщелачиванием при нормальном режиме работ для водных ресурсов не опасны, поскольку пустот не образуется или они заполняются хвостами подземного выщелачивания, а водные потоки перемещаются в замкнутом, легко контролируемом пространстве, например, по трубопроводам или обсаженным скважинам.

Подтверждением этого является практика уранодобывающего предприятия на базе Быкогорского месторождения. В течение почти 30 лет уран добывали выщелачиванием серноокислыми растворами на расстоянии 7 км от бальнеологического курорта с использованием для лечения минеральных вод. Смешивание питьевых вод и промышленных стоков предотвращалось путем создания технологического барьера с помощью вакуумных насосов.

Экономико-математическая модель для определения ущерба, наносимого выбросом неочищенных производственных стоков в окружающую среду, имеет

$$Y_{em} = \sum_1^n V_e \sum_1^m K_T C_e,$$

где  $Y_{em}$  – экономический ущерб, наносимый гидросфере технологическими комплексами;  $V_e$  – объем природной воды;  $K_T$  – коэффициент технологического загрязнения природной воды;  $C_e$  – цена воды;  $n$  – количество источников воды;  $m$  – количество технологических комплексов.

Рассматриваемые в настоящем исследовании вопросы представляют интерес при модернизации технологий разработки металлических месторождений в регионах с минимизацией негативного влияния на водные ресурсы и согласуются с результатами исследований по рассматриваемому направлению горного дела [17, 18].

### Заключение

Влияние горного производства на водные ресурсы состоит в повышении минерализации природных вод после контакта их с обнаженными и подробленными рудами и породами в выработанном пространстве и смешивании загрязненных вод с условно чистыми водами.

Конверсия горного производства на технологии с выщелачиванием ставит задачи мониторинга взаимодействия рудничных и природных водных потоков, которые должны решаться на стадии подготовки месторождения к эксплуатации.

Негативное влияние горного производства на водные ресурсы региона минимизируется использованием технологий разработки с выщелачиванием металлов из руд на месте их локализации.

### Список литературы / References

[1] Дмитрак Ю.В., Голик В.И., Вернигор В.В. Геомеханические предпосылки сохранения устойчивости выработок при разработке водообильных месторождений. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2018. 1. 218–229. [Dmitrak Yu.V., Golik V.I., Vernigor V.V. Geomechanical prerequisites for maintaining the stability of workings in the development of water-rich deposits. *Bulletin of the Tula State University. Earth Sciences*. 2018.1.218–229. (in Russian)].

[2] Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В., Радченко Д.Н. Проблема использования возобновляемых источников энергии в ходе разработки месторождений твердых полезных ископаемых. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, 2015, 1, 88–96. [Kaplunov D.R., Rylnikova M.V., Radchenko D.N. The problem of using renewable energy in the development of solid mineral deposits. *Physical and technical problems of mining*, 2015, 1, 88–96. (in Russian)].

[3] Комашенко В.И., Васильев П.В., Масленников С.А. Технологий подземной разработки месторождений КМА – надежную сырьевую основу. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*, 2016, 2, 101–114. [Komashchenko V.I., Vasiliev P.V., Maslennikov S.A. KMA underground mining technologies are a reliable raw material base. *Bulletin of Tula State University. Earth Sciences*, 2016, 2, 101–114. (in Russian)].

[4] Геомеханические и аэрогазодинамические последствия подработки территорий горных отводов шахт Восточного Донбасса/ Н.М. Качурин, Г.В. Стась, Т.В. Корчагина, М.В. Змеев. *Известия Тульского государственного университета. Сер. Науки о Земле*. Вып. 1. 2017. С. 170–

182. [Geomechanical and aerogasdynamic consequences of undermining the territories of allotments of mines in the Eastern Donbass. Kachurin, G. V. Stas, T. V. Korchagina, M. V. Zmeev. *Bulletin of the Tula State University. Ser. Earth Sciences*. 1. 2017. 170–182. (in Russian)].

[5] Голик В. И., Комашенко В. И. Отходы обогащения железистых кварцитов как сырье для доизвлечения металлов и использования в качестве закладочных смесей. *Горный журнал*. 2017, 3, 43–47. [Golik V. I., Komashchenko V. I. Ferrous quartzite enrichment waste as a raw material for additional extraction of metals and use as filling mixtures. *Mountain Journal*. 2017, 3, 43–47. (in Russian)]

[6] Ключев Р. В., Босиков И. И., Майер А. В., Гаврина О. А. Комплексный анализ применения эффективных технологий для повышения устойчивого развития природно-технической системы. *Устойчивое развитие горных территорий*, 2020, 2, 283–290. [Klyuev R. V., Bosikov I. I., Mayer A. V., Gavrina O. A. Comprehensive analysis of the use of effective technologies to improve the sustainable development of the natural and technical system. *Sustainable development of mountainous areas*, 2020, 2, 283–290. (in Russian)]

[7] Голик В. И., Лукьянов В. Г., Хашева З. М. Обоснование возможности и целесообразности использования хвостов обогащения руд для изготовления твердеющих смесей. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2015. Т. 326. № 5. С. 6–14. [Golik V. I., Lukyanov V. G., Hasheva Z. M. Substantiation of the possibility and expediency of using ore dressing tailings for the production of hardening mixtures. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources*. 2015. 326, 5, 6–14. (in Russian)].

[8] Xiao Li-ping. Study on Pollution Laws of Coal Gangue Leaching Solution to Groundwater System. *Fuxin: Liaoning Technical University*. 2007. 345–356.

[9] Амбросимов А. К. О стоке придонных вод Северного Каспия по палеоканалам в Дербентскую котловину. *Водные ресурсы*, 2015, 4, 380–387 [Ambrosimov A. K. About the runoff of bottom waters of the North Caspian through paleochannels to the Derbent Basin. *Water Resources*, 2015, 4, 380–387. (in Russian)].

[10] Игнатчик В. С., Кузнецов П. Н. Оптимизация систем водоснабжения и водоотведения. *Вода и экология: проблемы и решения*. 2016, 4, 26–35 [Ignatchik V. S., Kuznetsov P. N. Optimization of water supply and sanitation. *Water and ecology: problems and solutions*. 2016, 4, 26–35, (in Russian)].

[11] Качурин Н. М., Левковская В. В. Теоретическое обоснование закономерностей движения загрязненных шахтных вод в очистных фильтрах. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*, 2016, 3, 81–87. [Kachurin N. M., Levkovskaya V. V. Theoretical substantiation of the patterns of movement of contaminated mine water in sewage filters. *Bulletin of Tula State University. Earth Sciences*, 2016, 3, 81–87. (in Russian)].

[12] Крупская Л. Т., Голубев Д. А., Волобуева Н. Г. Оценка экологической ситуации территории в зоне влияния хвостохранилища с токсичными отходами. *Современные тенденции развития науки и технологий*, 2016, 1–2, 97–100. [Krupskaya L. T., Golubev D. A., Volobueva N. G. Assessment of the ecological situation of the territory in the zone of influence of the tailing dump with toxic waste. *Modern trends in the development of science and technology*, 2016, 1–2, 97–100. (in Russian)].

[13] Лискова М. Ю. Негативное воздействие, оказываемое на окружающую среду предприятиями по добыче и обогащению калийно-магниевых солей. *Вестник Пермского националь-*

ного исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2017. 16, 1, 82–88. [Liskova M. Yu. The negative impact on the environment of the enterprises for the extraction and enrichment of potassium and magnesium salts. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil and gas and mining*. 2017. 16, 1, 82–88. (in Russian)].

[14] Broder J. Merkel, Britta Planner-Freidrich. Groundwater Geochemistry-A practical guide to modeling of natural and contaminated aquatic systems. *Springer, Berlin*, 2005, 230–238.

[15] Голик В. И., Урумова Ф. М., Масленников С. А., Небылова Я. Г. К проблеме химизации окружающей среды при добыче металлических руд в горных регионах. *Безопасность труда в промышленности*. 2020. 8, 53–59. [Golik V. I., Urumova F. M., Maslennikov S. A., Nebylova Ya. G. On the problem of chemicalization of the environment during the extraction of metal ores in mountainous regions. *Labor safety in industry*. 2020. 8, 53–59. (in Russian)].

[16] Голик В. И., Разоренов Ю. И., Каргинов К. Г. Основа устойчивого развития РСО-Алания – горнодобывающая отрасль. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2017, 9.2 (32), 163–171. [Golik V. I., Razorenov Yu. I., Karginov K. G. The basis of sustainable development of North Ossetia-Alania is the mining industry. *Sustainable development of mountain areas*. 2017, 9.2 (32), 163–171. (in Russian)]

[17] Дмитрак Ю. В., Шишканов К. А. Разработка вероятностной кинематической модели мелющих тел в помольной камере вибрационной мельницы. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2010. 12, 302–308. [Dmitrak Yu. V., Shishkanov K. A. Development of a probabilistic kinematic model of grinding bodies in the grinding chamber of a vibration mill. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2010. 12, 302–308. (in Russian)]

[18] Yu S., Yang J., Liu G., Yao R., Wang X. Improvement for the multi-scale periodic characteristics revealing of precipitation signals and its impact assessment on soil hydrological process by combining NHT and CWT approaches. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2015, 15, 393–407.

[19] Комащенко В. И., Голик В. И., Белин В. А., Гапоненко А. Л. Повышение эффективности взрывной отбойки на основе новых способов инициирования скважинных зарядов на карьерах. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2014, 9, 293–304. [Komashchenko V. I., Golik V. I., Belin V. A., Gaponenko A. L. Improving the efficiency of explosive blasting based on new methods for initiating borehole charges in quarries. *Mountain Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2014, 9, 293–304. (in Russian)].

[20] Дубровская О. Г., Евстигнеев В. В., Кулагин В. А. Кондиционирование сточных вод энергетических систем и комплексов. *Журнал Сибирского федерального университета, Техника и технологии*, 2011, 6(4), 665–675. [Dubrovskaya O. G., Evstigneev V. V., Kulagin V. A. Waste water conditioning energy systems and complexes. *Journal of the Siberian Federal University, Technika and Technologies*, 2011, 6 (4), 665–675. (in Russian)].

[21] Габараев О. З., Дмитрак Ю. В., Дребенштедт К., Савелков В. И. Закономерности взаимодействия разрушенных геоматериалов и рудовмещающего массива при отработке подработанных вкрапленных руд. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2017. 9, 4(34), 406–413. [Gabaraev O. Z., Dmitrak Yu. V., Drebenstedt K., Savelkov V. I. Regularities of interaction of destroyed geomaterials and ore-bearing massif during mining of underworked disseminated ores. *Sustainable development of mountainous areas*. 2017. 9, 4(34), 406–413. (in Russian)].

DOI: 10.17516/1999-494X-0299

УДК 628.112.001(571.51)

## Reconstruction of the Water Supply to the City of Igarka of Krasnoyarsk Region

**Gregory V. Krasavin and Anatoly I. Matiushenko\***

*Siberian Federal University  
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 24.11.2020, received in revised form 18.01.2021, accepted 21.03.2021

**Abstract.** Some features of use of water supply systems in the conditions of the Far North are stated. The considered water supply system in Igarka prior to the reconstruction. The reasons for the need for reconstruction of existing water intake facilities are presented. The composition of the reconstructed water intake facilities is described. The experience of operation of reconstructed water supply facilities in Igarka is summarized.

**Keywords:** design and calculation of water sources, surface water sources, reconstruction of existing water intake facilities.

Citation: Krasavin G.V., Matiushenko A.I. Reconstruction of the water supply to the city of Igarka of Krasnoyarsk region, J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2021, 14(2), 187-197. DOI: 10.17516/1999-494X-0299

## Реконструкция водоснабжения г. Игарки Красноярского края

**Г. В. Красавин, А. И. Матюшенко**

*Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, Красноярск*

**Аннотация.** Изложены некоторые особенности исполнения систем водоснабжения в условиях Крайнего Севера. Рассмотрены системы водоснабжения г. Игарки до реконструкции. Представлены причины необходимости реконструкции существующих водозаборных сооружений. Изложен состав реконструированных сооружений. Обобщен опыт эксплуатации реконструированных сооружений водоснабжения.

**Ключевые слова:** проектирование и расчет водозаборов, поверхностные источники водоснабжения, реконструкция водозаборных сооружений.

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

\* Corresponding author E-mail address: matyshenko@icoud.com

## Введение

Освоение Севера России является важнейшей частью экономической стратегии страны. Основные запасы природных богатств, включая запасы пресной воды, сосредоточены на территории, занимающей почти три четверти Российской Федерации, и отнесены к северной строительно-климатической зоне. Хозяйственно-экономические и природно-климатические условия Севера различны, но общими для них являются: суровый климат, повсеместное сплошное, прерывистое или островное залегание многолетнемерзлых грунтов (криолитозона), продолжительные зимы до 8–9 месяцев, снеготаносы, пурги, малый меженный сток рек при их перемерзании и др. Для освоения северных территорий требуется надежное бесперебойное круглогодичное водоснабжение населенных мест и объектов промышленности. Водоснабжение в криолитозоне – один из главнейших факторов развития экономики, повышения уровня и качества жизни северян, снижения себестоимости продукции любых производств [1–4]. При организации водоснабжения объектов в любом районе криолитозоны учитывается реальная угроза перемерзания систем водоснабжения, в том числе и самих водоисточников [5–8].

Повышение надежности систем водоснабжения в зоне мерзлоты сводится к поддержанию незамерзаемости водоисточника и всех элементов водозаборного узла [9–16]. Наиболее надежны на Севере водозаборы инфильтрационного типа с фильтрующими водоприемниками, менее других подверженными шуголедовому воздействию. Они обладают хорошими рыбозащитными свойствами и обеспечивают требуемое качество воды при ее отборе. Поэтому при выборе типа водозабора для условий Севера всегда анализируют возможности использования инфильтрационных или фильтрующих водоприемников [11]. Малые и средние реки, перемерзающие на отдельных участках или на всем протяжении, являются наиболее вероятным источником (до 85 %) водоснабжения на Крайнем Севере [17–19].

За период освоения Севера выработаны различные приемы и технические решения водоснабжения из рек, не имеющих зимой достаточного объема поверхностного стока. Одними из них являются инфильтрационные водозаборы на малых реках Крайнего Севера, позволяющие обеспечивать надежный водозабор во всех случаях, когда годовое водопотребление составляет не менее 3–5 тыс. м<sup>3</sup>/сут. Источниками инфильтрационной воды в зимний период служат талики под руслами и долинами рек [10, 12, 19, 20].

Для повышения надежности работы инфильтрационных водозаборов в зимний период на малых реках Крайнего Севера используют временные (сезонные) водохранилища путем создания ледовых и ледово-грунтовых плотин, появляющихся в период начала ледостава и разрушающихся естественным образом в весенний период ледохода. При этом обводняются подрусьевые отложения, предотвращается образование наледей, улучшается тепловой режим водозаборов. При необходимости запас воды может увеличиваться намораживанием льда в начале зимы по всей площади акватории водозаборов слоем до 3–7 м. Так как часто на малых перемерзающих реках лед тает на месте без ледохода, возможно его использование в качестве материала для временных плотин, облегченных подпорных сооружений для накопления меженного стока [9, 18, 19].

### Реконструкции водозаборных сооружений в г. Игарке

На средних и крупных реках Крайнего Севера для обеспечения водоснабжения населенных пунктов и городов численностью порядка 4–5 тыс. человек, включая промышленные предприятия, экономически целесообразно использовать открытые водозаборы руслового или берегового типов. При этом необходимо учитывать специфику условий работы таких водозаборов, связанную с перепадами уровней воды в реках Севера, достигающими, к примеру, на Енисее в районе г. Игарки более 20 м, что требует специальных инженерных решений берегоукрепления в районе водозаборов. Но в отличие от инфильтрационных водозаборов водозаборы из открытых источников, как правило, нуждаются в дополнительной очистке и обеззараживании согласно требованиям санитарных правил и норм [21].

Конкретным примером современного инженерного решения водоснабжения северного города Игарки (рис. 1) служит реконструкция водоснабжения из р. Енисей, проведенная специалистами ОАО «Красноярский институт ВОДОКАНАЛПРОЕКТ».

До проведения реконструкции водозаборных сооружений в г. Игарке хозяйственно-питьевое водоснабжение осуществляли из временного открытого водозабора на р. Гравийка производительностью 4000 м<sup>3</sup>/сут. Вода через фильтрующие оголовки по самотечным водоводам поступала в два береговых шахтных колодца и затем насосной станцией 1-го подъема после обеззараживания гипохлоритом натрия по двум напорным водоводам диаметром 250 мм, длиной 3,5 км поступала в магистральные сети города и насосную станцию 2-го подъема, подкачивающую воду в сети города. С 1969 года система водоснабжения эксплуатировалась без



Рис. 1. Общий вид г. Игарки

Fig. 1. General view of Igarka

капитального ремонта. Износ системы составлял 80–95 %, сооружения насосной станции 1-го подъема и напорные стальные водоводы находились в полуаварийном состоянии. Качество воды из водозабора не соответствовало действующим нормам. Кроме того, в отдельные годы р. Гравийка перемерзала полностью, что приводило к остановке забора воды.

Водозаборные сооружения Игарского лесопильно-перевалочного комбината (ЛПК) выполнены по проекту «Ленгипродрев» и построены в 1968 году. Сооружения открытого типа из р. Енисей расположены на протоке Игарской. Вода из реки забиралась фильтрующими оголовками и по двум самотечным водоводам диаметром 426 мм поступала в береговой колодец, совмещенный с насосной станцией 1-го подъема, на площадку Игарского ЛПК и в старую застройку огорода. В настоящее время водозаборные сооружения законсервированы и не эксплуатируются по причине их аварийного состояния.

Важным элементом транспортного сообщения г. Игарки с «большой землей» является авиационное снабжение. Аэропорт расположен на острове Игарском. Остров находится напротив города и разделен протокой Енисея. На острове помимо аэропорта расположена котельная, а также соответствующие производственные и служебные сооружения. Для обеспечения водоснабжения на острове существует водозабор. Хозяйственно-питьевые нужды населения и котельной обеспечиваются из подземного водозабора с помощью двух скважин глубиной 100 м общим дебитом 336 м<sup>3</sup>/сут. Источником воды служит водоносный пласт, расположенный ниже слоя вечной мерзлоты.

Для снабжения горячей водой бытовых и производственных нужд населения, а также отопления зданий, сооружений и водоводов наземной прокладки в городе созданы временные водозаборные сооружения центральной отопительной котельной (ЦОК). Береговая насосная станция для подачи воды в центральную отопительную котельную для отопления жилого массива была построена на берегу протоки Игарской в 1985 году. Вода этой станцией подается потребителям без очистки и обеззараживания, поэтому качество воды не соответствует действующим нормам.

Анализ представленных выше водозаборных сооружений г. Игарки, выполненных в 60–80-е годы прошлого столетия, свидетельствует о крайне неудовлетворительном качестве воды, поставляемой потребителям, а также о предельном износе технических средств и объектов капитального строительства. Для решения назревших проблем требовалась реконструкция водоснабжения в целом и водозаборных сооружений в частности. С этой целью в ОАО «Красноярский институт ВОДОКАНАЛПРОЕКТ» была разработана проектная документация на строительство сооружений водоснабжения «КЕССОН».

Схема водоснабжения по проекту реконструкции представлена следующим образом. С помощью фильтрующих русловых оголовков по самотечно-сифонным линиям вода из протоки Игарской поступает в насосную станцию 1-го подъема и далее на водоочистные сооружения. После очистки и обеззараживания вода насосами 2-го подъема по двум водоводам протяженностью 3,1 км из стальных труб диаметром 273 × 6 мм подается на площадку существующего водопроводного узла г. Игарки. Схема водоснабжения приведена на рис. 2.

В состав реконструируемых водозаборных сооружений хозяйственно-питьевого водоснабжения вошли следующие наиболее значимые объекты: русловой водозаборный оголовок; самотечно-сифонный водовод с насосной станцией 1-го подъема (рис. 3), производительно-

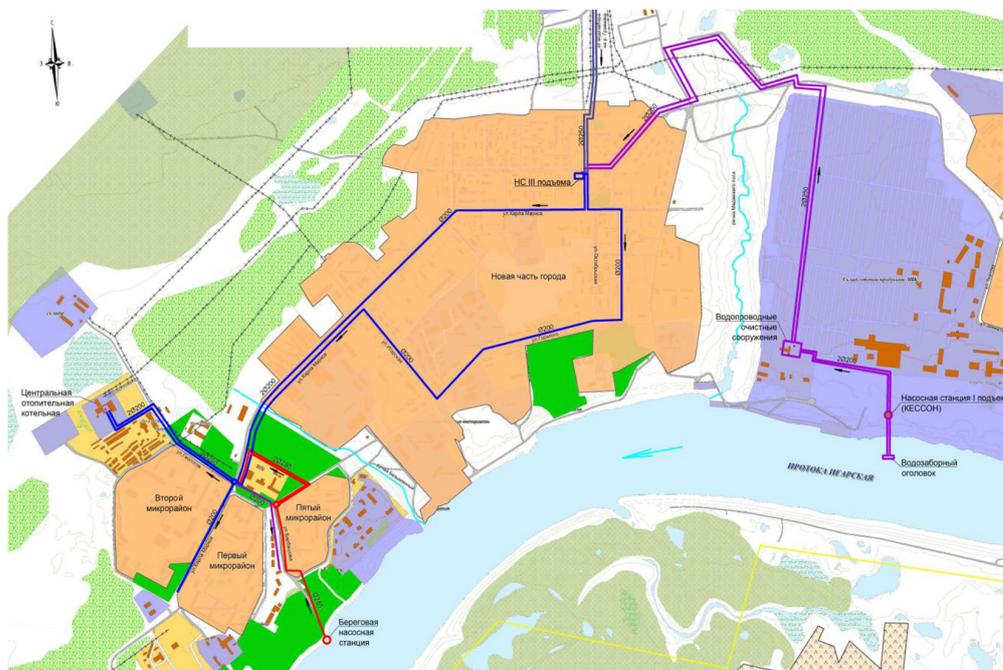


Рис. 2. Схема водоснабжения г. Игарки

Fig. 2. Water supply scheme in Igarka

стью  $4200 \text{ м}^3/\text{сут}$ ; водовод надземной прокладки в две нитки от насосной станции 1-го подъема до станции очистки воды длиной  $0,6 \text{ км}$ ; сооружения очистки воды для хозяйственно-питьевых целей производительностью  $4200 \text{ м}^3/\text{сут}$ ; насосная станция 2-го подъема производительностью  $6480 \text{ м}^3/\text{сут}$ ; резервуары чистой воды (2 шт.) емкостью  $1000 \text{ м}^3$  каждый; водовод надземной прокладки от насосной станции 2-го подъема до насосной станции подкачки в городе длиной  $3,1 \text{ км}$  в две нитки.

Проектом реконструкции водозабора предусмотрено устройство нового водоприемного оголовка раструбного типа. Конструкция оголовка принята по типовому проекту. Оголовок смонтирован на железобетонной плите размером  $2 \times 2 \text{ м}$  и состоит из двух секций. Каждая секция оборудована съемной фильтрующей рыбозащитной самоочищающейся кассетой размером  $1 \times 0,6 \text{ м}$ , совмещенной с сороудерживающей решеткой. Рыбозащита обеспечена малыми входными скоростями воды, которые в  $8\text{--}10$  раз меньше скоростей течения в протоке в межень ( $0,3 \text{ м/с}$ ). Для защиты оголовка от пльвущего льда вокруг него предусмотрена свайная защита. Незначительная мутность речной воды ( $4\text{--}62 \text{ г/м}^3$ ) и конструктивная возможность самоочищения препятствуют заиливанию водоприемника.

Самотечно-сифонные водоводы подают воду от руслового водоприемного оголовка к насосной станции 1-го подъема по двум стальным трубам диаметром  $325 \times 8 \text{ мм}$  и длиной  $105 \text{ м}$ . Глубина заложения трубопроводов составляет от  $1$  до  $20 \text{ м}$ . Подводная часть водоводов выполнена с усиленной наружной гидроизоляцией и внутренним лакокрасочным покрытием эмалью. Защита наружной гидроизоляции сделана сплошной футеровкой деревянными рейками. Стыковка труб с оголовком осуществлена с помощью полумуфт с резиновым уплотнением.

Подводная часть водоводов проложена в открытой траншее методом свободного погружения, подземная часть водоводов выполнена методом продавливания от береговой черты до насосной станции 1-го подъема.

При модернизации насосной станции использовано существовавшее сооружение. Насосная станция производительностью 4200 м<sup>3</sup>/сут заблокирована с двухсекционным водоприемником. Подземная часть насосной станции диаметром 10 м представляет собой железобетонный колодец – кессон глубиной 27,7 м. Колодец разделен вертикальной стенкой на водоприемник и «сухой» машинный зал. Водоприемник разделен перегородкой на две секции, в каждую из которых вводится самотечно-сифонный водовод. В машинном зале установлены основные насосы фирмы «GRUNDFOS» марки NB65–200/190 мощностью 18,5 кВт каждый, два рабочих, один – резервный (рис. 3).

Для осушения водоприемной камеры при ремонтных работах предусмотрен переносной погружной насосный агрегат «ГНОМ» 40 × 25 мощностью 4 кВт. Зарядка сифонных водоводов

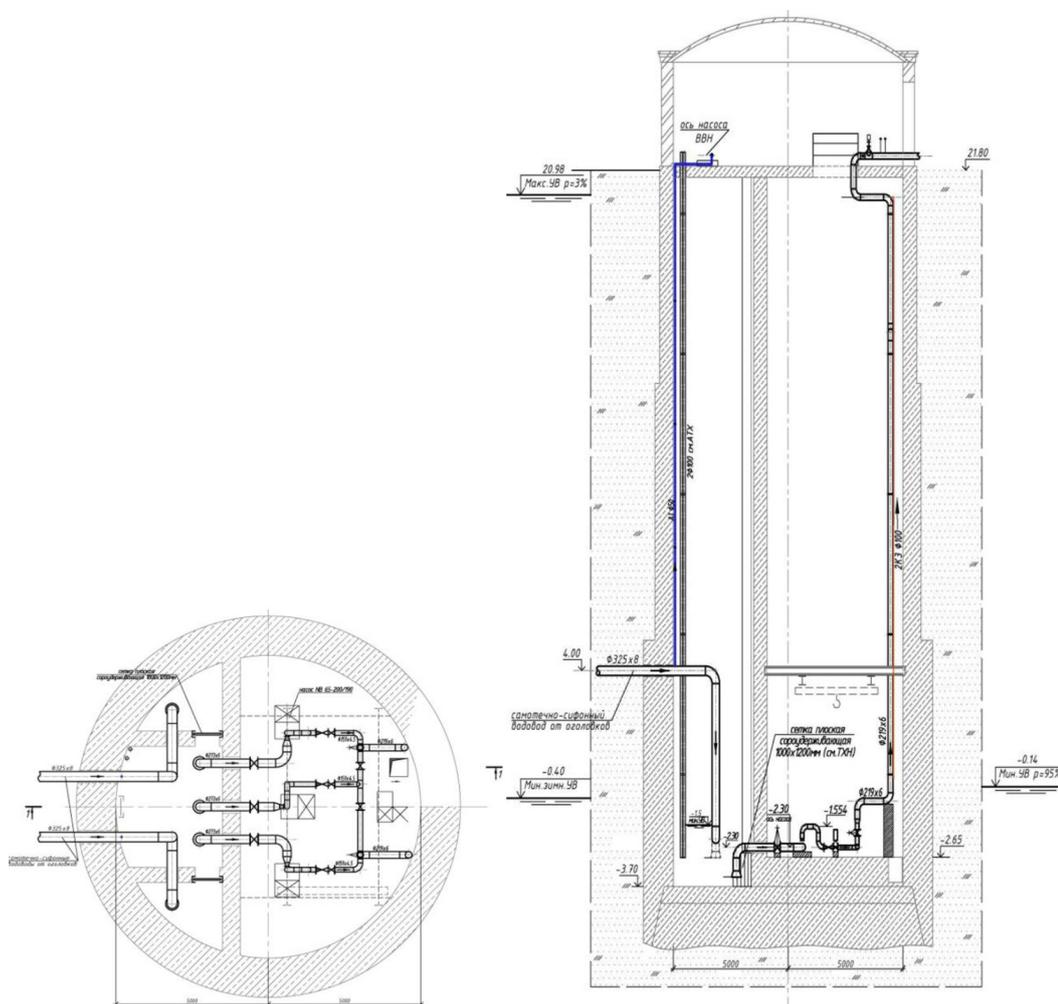


Рис. 3. Насосная станция 1-го подъема

Fig. 3. Pumping station of the first lift

и поддержание нормального режима их работы выполнены вакуумной установкой с двумя насосами ВВН1–1,5, из которых один рабочий, другой резервный. Для откачки дренажных вод предусмотрены два насоса ВК 4/28 мощностью 7 кВт каждый. В надземной части насосной станции расположено электротехническое оборудование, монтажная площадка, установка вентиляции, служебные помещения. Все основные технологические процессы работы насосной станции автоматизированы. Управление и контроль за работой узла осуществляются с диспетчерского пункта на станции очистки воды.

Напорные водоводы от насосной станции 1-го подъема до площадки водопроводных очистных сооружений выполнены двумя стальными трубами диаметром  $219 \times 6$  мм с тепловой пенополиуретановой изоляцией с защитной оболочкой из оцинкованной стали с саморегулирующимся греющим электрическим кабелем. Прокладка труб выполнена наземной на лежневых опорах, размещенных на грунтовых призмах. Для опорожнения напорных водоводов предусмотрена установка пожарных гидрантов в незамерзающем исполнении. Отведение воды при опорожнении производится пожарными рукавами в пониженные места.

В период паводка и ледохода вода в районе водозабора поднимается более чем на 22 м. Для предотвращения размыва площадки водозаборных сооружений в период паводковых высоких вод и ледохода выполнено берегоукрепление из сборных железобетонных плит размером  $3 \times 1,5$  м.

Очистка исходной воды после водозабора, подъема на насосной станции 1-го подъема производится на комплексе блочно-модульной станции водоподготовки, разработанной ЗАО «Компания ЭКОС» (рис. 4).

Схема очистки малозагрязненных природных поверхностных вод до показателей, соответствующих санитарным нормам, производится на станции очистки воды и предусматривает



Рис. 4. Комплекс блочно-модульной станции водоподготовки

Fig. 4. Complex of block-modular water treatment plant



Рис. 5. Станция очистки воды

Fig. 5. Water treatment plant

следующие стадии технологического процесса: фильтрация на сетчатых фильтрах; контактное осветление; фильтрация на фильтрах с загрузкой активированным углем; обеззараживание; нагрев; наполнение в резервуары чистой воды и подача потребителю (рис. 5).

Исходная вода подается под напором на сетчатые фильтры, которые промываются в автоматическом режиме. После предварительной механической очистки вода поступает во входную камеру и на контактные осветлители. Перед этим в воду вводится раствор коагулянта. Промывка контактного осветлителя водовоздушная, подача промывной воды осуществляется из насосов производительностью  $85 \text{ м}^3/\text{ч}$  и напором 20 м. Воздух подает воздуходувка с производительностью  $510 \text{ м}^3/\text{ч}$  и напором 10 м. Отвод промывной воды идет в два резервуара грязных промывных вод с последующей откачкой ассенизационной машиной.

Обеззараживание воды производят низкоконцентрированным (0,8 %-ным) раствором гипохлорита натрия, полученным электролизным способом на установке Clorogen CLGH-500 из пищевой соли. Производительность электролизной по активному хлору  $12,6 \text{ кг}$  в сутки. Расход соли при этом составляет  $44,1 \text{ кг/сут}$ . Время контакта активного хлора с водой обеспечено в резервуаре чистой воды и равно не менее 30 мин согласно санитарным правилам и нормам. Принятая доза по активному хлору  $2\text{--}3 \text{ мг/л}$ . Доза остаточного хлора  $0,3\text{--}0,5 \text{ мг/л}$ . Контроль свободного хлора осуществляется датчиком.

Устранение в воде остатков органических веществ, цветности воды и запахов производится на фильтрах с загрузкой активированным углем. Технология фильтрации предусматривает взрыхление и промывку сорбционной загрузки. Взрыхление осуществляют от насосов подачи

промывной воды, подача воздуха – от воздуходувки. Взрыхление угольных фильтров обеспечивает их промывку и регенерацию. Отвод промывной воды предусматривается в резервуары грязных промывных вод с последующей откачкой ассенизационной машиной. Несоблюдение технологии взрыхления может приводить к выбросу адсорбента и загрязнению воды.

Для исключения замерзания воды в водоводах в часы минимального водоразбора и выполнения требований эксплуатирующей организации г. Игарки в схеме водоснабжения предусмотрен подогрев воды до 20 °С. После сорбционных фильтров очищенная и обеззараженная вода поступает в установку нагрева «Титан», состоящую из двух узлов «Титан-500» и «Титан-750». Нагрев осуществляется индукционным электронагревателем «Эдиссон-250». Для циркуляции теплоносителя установлен циркуляционный насос. Установка нагрева работает в автоматическом режиме. Подогретая вода поступает в резервуар чистой воды и далее насосами 2-го подъема подается потребителям. Контроль качества воды перед ее поступлением в распределительную сеть на водопроводной очистительной станции осуществляется в лаборатории по органолептическим показателям и химическому составу.

### Выводы

В результате проведенной реконструкции сооружений и оборудования системы хозяйственно-питьевого водоснабжения г. Игарки по проектной документации ОАО «Красноярский институт ВОДОКАНАЛПРОЕКТ» с момента сдачи в эксплуатацию в сентябре 2017 года город получил надежное и качественное водоснабжение. Этому способствовало внедрение передовых технологий водоподготовки и подачи воды потребителям. Современный уровень водоснабжения населения и предприятий города обеспечен автоматизацией основных технологических процессов, что позволило вести контроль и управление всех узлов подачи воды с диспетчерского пункта на блочной станции очистки. Большую роль в повышении надежности работы систем водоснабжения играет применение современного гидромеханического, электрического оборудования, КИП и автоматики, систем диспетчеризации и связи.

### Список литературы / References

- [1] Матюшенко А. И., Кулагин В. А., Турутин Б. Ф. *Экология водопользования в криолитозоне*. М.: Маджента, 2013. 376 с. [Matyushenko A. I., Kulagin V. A., Turutin B. F. *Ecology of water use in the permafrost zone*. Moscow, Magenta, 2013. 376 p. (In Russian)]
- [2] Матюшенко А. И., Турутин Б. Ф., Лютов А. В. *Инженерно-экологические основы систем водоснабжения Сибири и Крайнего Севера*. Красноярск: КрасГАСА, 2000. 158 с. [Matyushenko A. I., Turutin B. F., Lyutov A. V. *Engineering and ecological foundations of water supply systems in Siberia and the Far North*. Krasnoyarsk, KrasGASA, 2000, 158 p. (In Russian)]
- [3] Матюшенко А. И., Лютов А. В., Кулагин В. А., Турутин Б. Ф. *Теплофизика систем водоснабжения*. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2002. 224 с. [Matyushenko A. I., Lyutov A. V., Kulagin V. A., Turutin B. F. *Thermal physics of water supply systems*. Krasnoyarsk, IPTs KSTU, 2002. 224 p. (In Russian)]
- [4] Матюшенко А. И., Турутин Б. Ф., Лютов А. В. *Комплексное использование водных ресурсов (Восточно-Сибирские регионы)*; ред. Б.Ф. Турутин. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2003.

300 с. [Matyushenko A. I., Turutin B. F., Lyutov A. V. *Integrated use of water resources (East Siberian regions)*; ed. B. F. Turutin. Krasnoyarsk, IPC KSTU, 2003. 300 p. (In Russian)]

[5] Кулагин В. А., Крючков Г. П. Инженерно-экологическая особенность проектирования водозаборных сооружений сибирских регионов. *Экология урбанизированных территорий*, 2007, 3, 65–68. [Kulagin V. A., Kryuchkov G. P. An engineering and environmental feature of the design of water intake facilities in Siberian regions. *Ecology of urbanized areas*, 2007, 3, 65–68. (In Russian)]

[6] Матюшенко А. И., Кулагина Т. А., Шайхадинов А. А., Тугужаков Д. Б. Повышение эффективности эксплуатации трубопроводов в условиях Сибири и Крайнего Севера. *Журнал СВУ. Техника и технологии*, 2015, 8(2), 216–226. [Matyushenko A. I., Kulagina T. A., Shaikhadinov A. A., Tuguzhakov D. B. Improving the efficiency of pipeline operation in Siberia and the Far North. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2015, 8(2), 216–226. (In Russian)]

[7] Кулагин В. А., Кулагина Т. А., Матюшенко А. И., Турутин Б. Ф. *Физика атмосферы и гидрофизика*. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. 498 с. [Kulagin V. A., Kulagina T. A., Matyushenko A. I., Turutin B. F. *Physics of the atmosphere and hydrophysics*. Krasnoyarsk, IPC KSTU, 2006. 498 p. (In Russian)]

[8] Турутин Б. Ф., Лютов А. В., Матюшенко А. И. Экология и системы водоснабжения в условиях Сибири: Матер. международной конференции по экологии. Иркутск, 1996. [Turutin B. F., Lyutov A. V., Matyushenko A. I. Ecology and water supply systems in Siberia: *Mater. international conference on ecology*. Irkutsk, 1996. (In Russian)]

[9] Матюшенко А. И., Яковлева М. Г. Повышение интенсивности работы инфильтрационных водозаборов с учетом сложных теплофизических условий сибирских регионов. *Вестник ИрГТУ*, 2010, 6(46), 162–170. [Matyushenko A. I., Yakovleva M. G. Increasing the work intensity of infiltration water intakes, taking into account the complex thermophysical conditions of the Siberian regions. *ISTU Bulletin*, 2010, 6(46), 162–170. (In Russian)]

[10] Турутин Б. Ф., Матюшенко А. И. *Водозаборные сооружения из подземных источников (теория, расчет и оптимизация)*. Красноярск: КГТУ, 1996. 184 с. [Turutin B. F., Matyushenko A. I. *Intake structures from underground sources (theory, calculation and optimization)*. Krasnoyarsk, KSTU, 1996. 184 p. (In Russian)]

[11] Порядин А. Ф. *Устройство и эксплуатация водозаборов*. М.: Стройиздат, 1984. 183 с. [Poryadin A. F. *Construction and operation of water intakes*. Moscow, Stroyizdat, 1984. 183 p. (In Russian)]

[12] Вдовин Ю. И. *Водоснабжение на Севере*. Л.: Стройиздат, Ленинградское отд. 1987. 166 с. [Vdovin Yu. I. *Water supply in the North*. L., Stroyizdat, Leningrad dep. 1987. 166 p. (In Russian)]

[13] Вдовин Ю. И. Забор воды из перемерзающих рек. *Водоснабжение и санитарная техника*, 1989, 4, 20–22. [Vdovin Yu. I. Water intake from freezing rivers. *Water supply and sanitary equipment*. 1989, 4, 20–22. (In Russian)]

[14] Вдовин Ю. И. Направления совершенствования систем водоснабжения в районах Севера. *Современные технологии водоснабжения: Сб. материалов ДВПТИ*. Владивосток, 1990, 81–85. [Vdovin Yu. I. Directions for improving water supply systems in the North. *Modern water supply technologies: Sat. materials DVPTI*. Vladivostok, 1990, 81–85. (In Russian)]

[15] Матюшенко А. И., Турутин Б. Ф., Кулагин В. А. *Водоснабжение и водопотребление г. Красноярска*. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. 329 с. [Matyushenko A. I., Turutin B. F.,

Kulagin V. A. *Water supply and water consumption in Krasnoyarsk*. Krasnoyarsk, IPTs KSTU, 2006. 329 p. (In Russian)].

[16] Шони́на Н. А. Водоснабжение и водоотведение в условиях Крайнего Севера. *Санитарная техника*, 2012, 5, 32–43. [Shonina N. A. Water supply and sewerage in the Far North. *Sanitary engineering*. 2012, 5, 32–43. (In Russian)]

[17] Аржакова С. К. *Минимальный сток рек криолитозоны России*. Санкт-Петербург: Изд. РГГМУ, 2001. 208 с. [Arzhakova S. K. *The minimum flow of rivers in the permafrost zone of Russia*. St. Petersburg, Publishing house. RGGMU, 2001. 208 p. (In Russian)]

[18] Файко Л. И. *Использование льда и ледовых явлений в народном хозяйстве*. Красноярск: Изд. Красноярского ГУ, 1986. 158 с. [Faiko L. I. *Use of ice and ice phenomena in the national economy*. Krasnoyarsk, Ed. Krasnoyarsk State University, 1986. 158 p. (In Russian)]

[19] Вдовин Ю. И., Вишне́вская Н. С. *Водозаборно-очистные сооружения в системах водоснабжения в криолитозоне России*. М.: Изд. РУДН, 2007. 236 с. [Vdovin Yu. I., Vishnevskaya N. S. *Water intake and treatment facilities in water supply systems in the permafrost zone of Russia*. Moscow, Ed. RUDN, 2007. 236 p. (In Russian)]

[20] *Пособие по проектированию сетей водоснабжения и канализации в сложных инженерно-геологических условиях* (к СНиП 2.04.02–84 и 2.04.03–85). М.: Союзводоканалпроект, 1990. 56 с. [*Manual for the design of water supply and sewerage networks in difficult engineering and geological conditions* (to SNiP 2.04.02–84 and 2.04.03–85). M., Soyuzvodokanalproekt, 1990. 56 p. (In Russian)]

[21] Матюшенко А. И., Красавин Г. В. Особенности проектирования водозаборов в условиях Севера. *Журнал СФУ. Техника и технологии*, 2018, 11(1), 116–122. [Matyushenko A. I., Krasavin G. V. Features of the design of water intakes in the North. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2018, 11(1), 116–122. (In Russian)]

DOI: 10.17516/1999-494X-0300

УДК 621.891:001.891.573

## Numerical Modeling of Tribological Characteristics of Fibrous Polymer Composite Materials

**Denis D. Palkin\* and Andrey A. Chekalkin**

*Perm National Research Polytechnic University  
Perm, Russian Federation*

Received 03.12.2020, received in revised form 15.02.2021, accepted 21.03.2021

**Abstract.** The paper presents a numerical simulation of the contact interaction of fibrous polymer composite materials in a finite element ANSYS package and studies the friction coefficients for cells with wear of 0%, 25%, 50% and 75%. To predict the coefficient of friction of composites it was proposed to use the method of mechanics of composite materials – the method of local approximation. With the help of numerical simulation, the fields of distribution of normal stresses and contact stresses in the contact zone were obtained and the corresponding conclusions were drawn.

**Keywords:** friction coefficient, fibrous composite materials, polymer composite materials, numerical modeling, contact stresses, local approximation method, unidirectional composite materials, tetragonal structure, dry friction, tribological characteristics.

Citation: Palkin D.D., Chekalkin A.A. Numerical modeling of tribological characteristics of fibrous polymer composite materials, J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2021, 14(2), 198-206. DOI: 10.17516/1999-494X-0300

## Численное моделирование коэффициентов трения однонаправленных волокнистых композитов тетрагональной структуры

**Д.Д. Палкин, А.А. Чекалкин**

*Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет  
Российская Федерация, Пермь*

**Аннотация.** В работе представлено численное моделирование контактного взаимодействия волокнистых полимерных композиционных материалов в конечно-элементном пакете ANSYS и исследованы коэффициенты трения для ячеек с износом 0, 25, 50 и 75 %. Для прогнозирования

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

\* Corresponding author E-mail address: llorddark3@gmail.com

коэффициента трения композитов было предложено использовать метод механики композиционных материалов – метод локального приближения. С помощью численного моделирования получены поля распределения нормальных напряжений и контактных напряжений в зоне контакта и сделаны соответствующие выводы.

**Ключевые слова:** коэффициент трения, волокнистые композиционные материалы, полимерные композиционные материалы, численное моделирование, контактные напряжения, метод локального приближения, однонаправленные композиционные материалы, тетрагональная структура, сухое трение, трибологические характеристики.

---

Цитирование: Палкин, Д.Д. Численное моделирование коэффициентов трения однонаправленных волокнистых композитов тетрагональной структуры / Д.Д. Палкин, А.А. Чекалкин // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2021, 14(2). С. 198-206. DOI: 10.17516/1999-494X-0300

---

## Introduction

For the development of modern engineering to develop new materials with improved properties of materials considering a number of factors and their purpose. In the case of tribological materials in the friction units of structures, it is necessary to know their tribological characteristics of the materials, for example, the coefficient of friction of the material.

For the development and creation of composite materials and the calculation of structures from them, corresponding theoretical knowledge is required, based on the mechanics of homogeneous bodies and considering their structural heterogeneity. For this, mathematical models and methods for solving problems in the mechanics of structurally heterogeneous bodies have been developed. Methods mechanics predict properties of composite materials of different structures. In various works, the forecasting of elastic, elastic-plastic and viscoelastic properties, stiffness and strength properties, fatigue life characteristics and other characteristics of composite materials is displayed [1-3]. Thus, they are acceptable for predicting any properties of materials that are used in structures for various purposes. Therefore, the method of mechanics of composite materials can be used to predict the tribological characteristics of the material.

In the case of the application of tribotechnical constructions, the materials must have high tribological characteristics. When using composite materials in friction nodes, their tribological characteristics are not real material properties, but depend on the system in which these composite materials should work [4-7]. Modern works are devoted to the experimental study of the tribological characteristics of materials. In an experimental study, it is necessary to consider the geometry of the contact pair, the kinematics of the movement of the tribocouple, the presence and type of lubricant, etc. The study of the tribological characteristics of composite materials must consider many factors that affect them.

The article discusses a model of contact interaction of unidirectional fiber composites of fibers in order to study the tribological characteristics of the coefficient of friction of the material. The subject of study of this work is to study the coefficient of friction of a unidirectional fiber composite from a position of the mechanics of composite materials. The object of the study are unidirectional fiberglass and carbon composites, which constitute the polymeric material reinforced with continuous fibers in one direction.

## Materials and Methods

One of the main characteristics of tribological material is a coefficient of friction which is defined by the law Amontons-Coulomb [8]:

$$F_{mp} = kN \quad (1)$$

where  $N$  – normal reaction force,  $k$  – coefficient of friction,  $F_{mp}$  – friction force.

The Amontion-Coulomb law (1) was originally formulated for homogeneous materials and did not consider the influence of the structure of the material. But if we assume that the law of friction is applicable at the level of the components of the composite structure, then the methods of mechanics of composite materials make it possible to predict the effective tribological characteristics of the composite.

The paper considers the contact problem for an inhomogeneous medium, the model of contact interaction of a fibrous composite with a tetragonal arrangement of fibers (Fig. 1). The periodicity cell is rectangular. At the interface fiber-matrix condition of strain compatibility and condition of perfect contact at the interface between steel-composite.

For an inhomogeneous medium it is assumed that the periodicity cell averaged field structural stress and strain correspond to the macroscopic.

*The method of local approximation.* The local approximation method uses the short-range effect in the interaction of inhomogeneities and is based on the principle of locality. The essence of the method is to replace the periodic problem with a boundary value problem for a domain containing a finite number of inclusions [1]:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij,j}(\vec{r}) &= 0, \\ \sigma_{ij}(\vec{r}) &= \lambda(\vec{r})\varepsilon_{\alpha\alpha}(\vec{r})\delta_{ij} + 2\mu(\vec{r})\varepsilon_{ij}(\vec{r}), \\ \varepsilon_{ij}(\vec{r}) &= \frac{1}{2}[u_{i,j}(\vec{r}) + u_{j,i}(\vec{r})]. \end{aligned} \quad (2)$$

Elastic Lamé constants in the physical equations are piecewise-homogeneous periodic functions, and macrostresses will correspond to structural stresses at the boundary of the periodicity cell:

$$\sigma_{ij}(\vec{r})|_{\omega} = s_{ij}. \quad (3)$$

This follows from the equivalence volume and surface conditions and averaging uniform stress distribution on the surface of the periodicity cell. Method uses a low-order effect, the periodicity of the lateral boundaries of the cell in the plane of contact is not moved. Matrix and fiber material are considered homogeneous and isotropic.

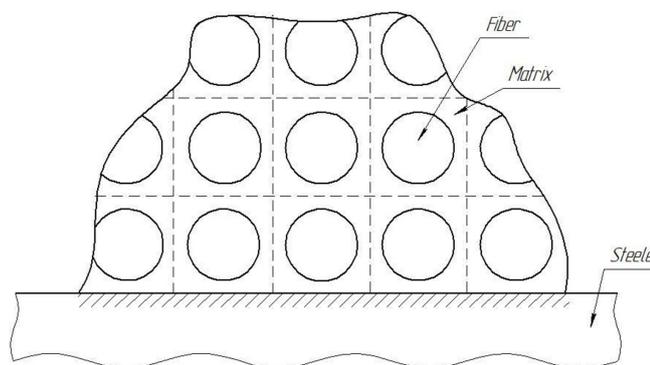


Fig. 1. Model of contact interaction of a unidirectional fibrous composite with an elastic deformable body

*Research Methodology.* The following technique is used to determine the effective friction coefficients of composites. For this, a periodicity cell (Fig. 2) is allocated in the composite material, which is located at the interface between the steel support and the contact. At the upper boundary of the selected cell, compressive stresses are applied (Fig. 2) so that the fibrous composite material is pressed against the steel support and contact interaction occurs in the steel-composite friction pair. In two-dimensional modeling of the stress state in the steel-composite contact zone, a finite element mesh with four nodes (Plane 182) was used, as well as the ideal contact condition at the steel-composite interface. The contact stresses during the FEM analysis are determined for each edge adjacent to the steel-composite contact line of the final element on a rib belonging to the contact line. Using the law of friction (1) for the components of the structure of a unidirectional composite allows one to determine the friction force in individual sections of the contact line corresponding to the edges of the finite element mesh. Within the edge of the final element, contact interaction is carried out either for a steel-fiber pair or for a steel-matrix pair. The obtained contact stress elements, the frictional force is determined by the total:

$$F_{mp} = \sum_{i=1}^n F_{mp}^i. \quad (4)$$

The law of friction (1) holds for a fibrous composite at a macroscopic level, then the friction force in a steel-composite pair can be expressed as follows:

$$F_{mp} = kF_N = k\sigma_y\delta \quad (5)$$

where  $\sigma_y$  – preassigned stress;  $\delta$  – contact size;  $k$  – coefficient of friction of the composite material. The effective coefficient of friction of a unidirectional fibrous material with a tetragonal structure for a steel-composite pair can be obtained from relations (4) and (5):

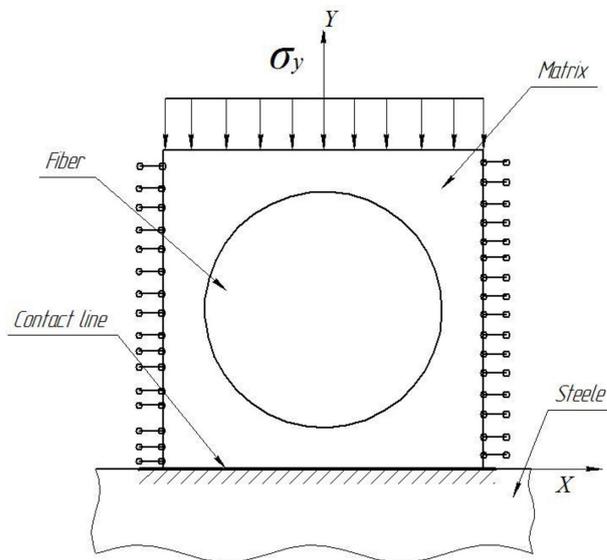


Fig. 2. The principle of locality in the problem of contact interaction of a unidirectional fibrous composite with a deformable body

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n F_{mp}^i}{\sigma_y \delta}. \quad (6)$$

The resulting ratio is significantly different from the recommended for evaluating the tribotechnical properties of composites mixtures:

$$k = V_1 k_1 + V_2 k_2 \quad (7)$$

where  $V_1, V_2$  – volume fractions of fibers and matrix;  $k_1, k_2$  – friction coefficients steel-fiber and steel-matrix.

## Results

As the objects of modeling unidirectional fibrous polymer composite are used carbon fiber and fiberglass based on an epoxy matrix (Table 1). The cell size of the periodicity is taken equal to 6.28 microns.

Table 1. Elastic properties and coefficients of friction of materials

Materials	Young's modulus, GPa	Poisson's ratio	Coefficient of friction on steel
Epoxy resins [9, 10]	4	0,34	0.12
Carbon fiber VMN-4 [9, 11]	270	0,28	0.15
Fiberglass C-Glass [9, 11]	70	0,22	0.5
Steel [9, 11]	200	0,25	–

The fiberglass diameter is assumed to be 6  $\mu\text{m}$  in size, while the volume fraction of fiberglass in the fiberglass periodicity cells will be considered equal to 71.5%. For carbon fiber, the fiber diameter will be 5.26 microns with a volume fraction of 55%. The periodicity cell size is 6.28  $\mu\text{m}$ .

At the upper boundary of the periodicity cell, stresses are set  $\sigma_y = 100 \text{ H/M}^2$ .

To account for the effect of wear on the friction coefficient in a pair of steel-composite simulated four tetragonal cell configurations in the contact zone. Figure 4 shows the breakdown of the contact zones into finite elements and the distribution of normal stresses relative to the steel-composite contact plane for a full-fledged periodicity cell (Fig. 3, a), as well as for cells with 25% wear (Fig. 3, b), 50% (Fig. 3, c) and 75% (Fig. 3, d).

Figures 4 and 5 shows the distribution of contact pressure for unidirectional fibrous composites: fiberglass reinforcement with a volume fraction of 71.5% (Fig. 4) and the carbon fiber reinforcement with a volume fraction of 55% (Fig. 5).

The distribution of normal contact stresses has a significant heterogeneity even in the steel-matrix interaction (Fig. 4, a and 5, a), the presence of a more rigid inclusion in the form of glass or carbon fiber causes a change in structural stresses in the steel-matrix contact zone by 4.5 times. When half the cell is worn (Fig. 4, c and 5, c), the contact stresses in the steel-fiber pair are distributed fairly evenly, and in the steel-matrix contact zone the stress level is much lower. Perhaps the most interesting are the

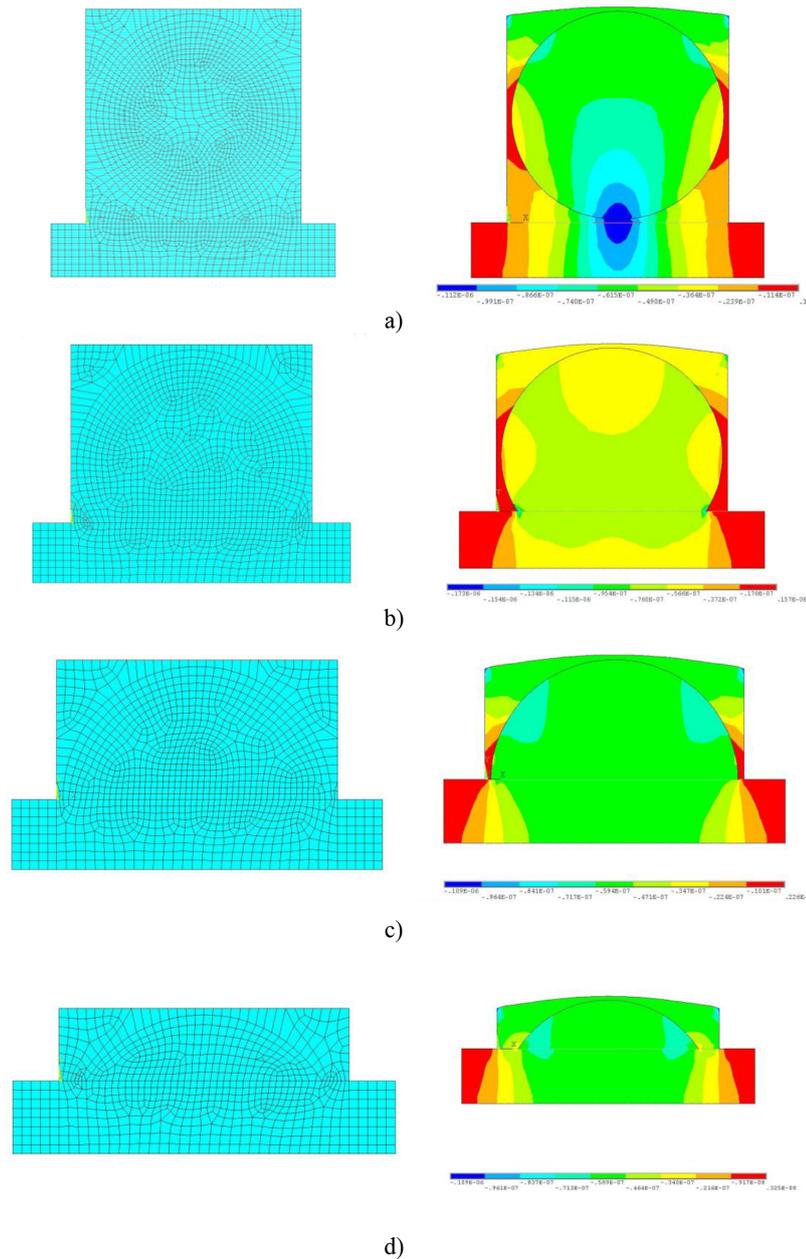


Fig. 3. The mesh of finite elements and the field of normal stresses (MPa) unidirectional fiberglass with various wear: a) there is no wear, b) wear 25%, c) wear 50%, d) wear 75%

stress distributions with wear by a quarter (Fig. 4, b and 5, b) and three quarters (Fig. 4, d and 5, d) of the tetragonal periodicity cell, since with an equal length of the steel-fiber or steel contact line -matrix, a qualitative difference in forms is observed. When a quarter of the cell is worn (Fig. 4, b and 5, b), the distribution of contact stresses is similar to the distribution at half wear (Fig. 4, c and 5, c), when almost uniform, the highest stresses arise in the fiber and insignificant stresses in the matrix. When the cell wears by three quarters (Fig. 4, d and 5, d), with a fairly uniform distribution of structural contact

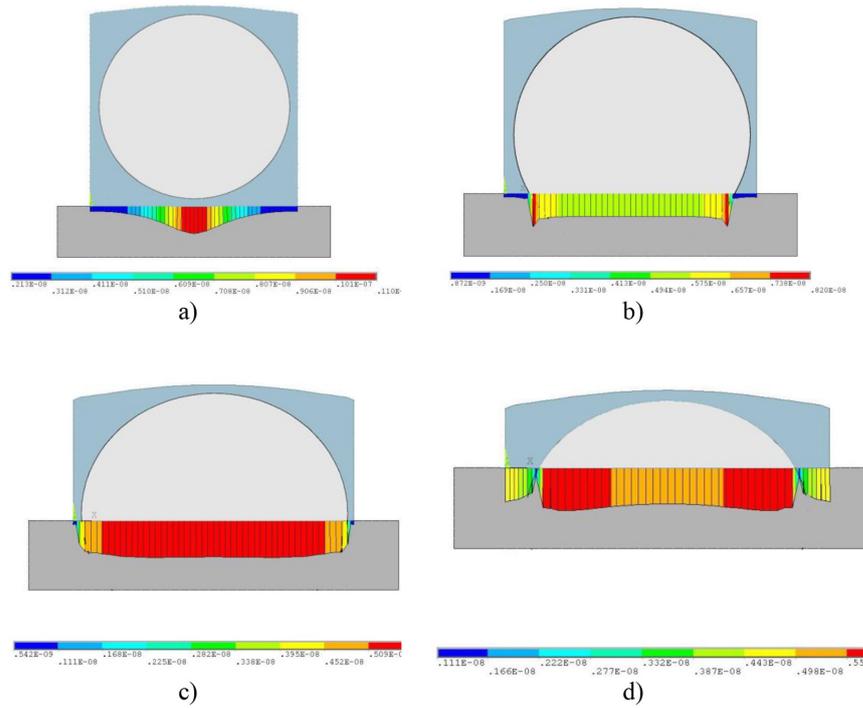


Fig. 4. Contact stresses (MPa) in fiberglass with a fiber share of 71.5%: a) there is no wear, b) wear 25%, c) wear 50%, d) wear 75%

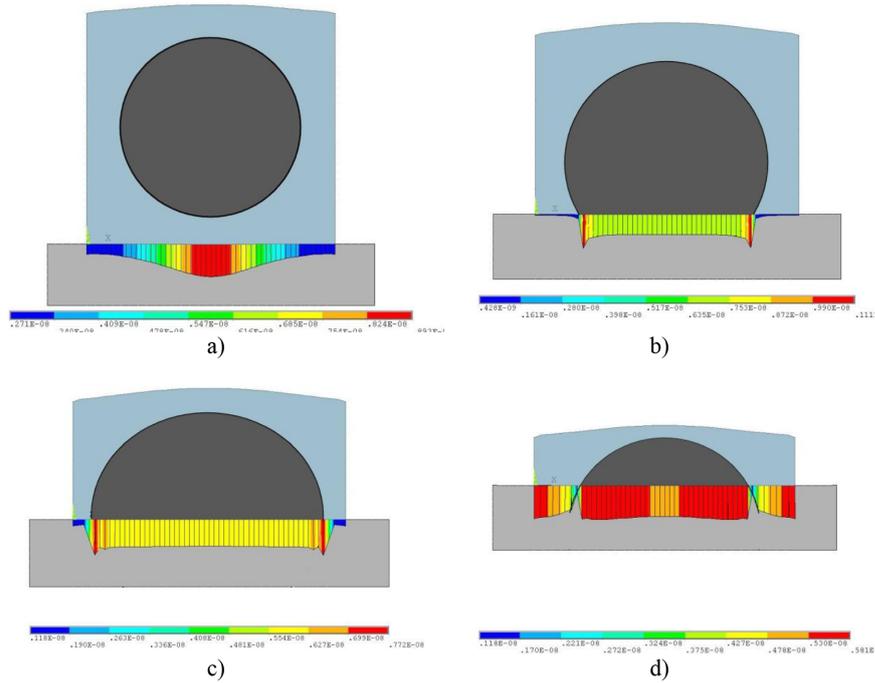


Fig. 5. Contact stresses (MPa) in carbon fiber with a fiber fraction of 55%: a) there is no wear, b) wear 25%, c) wear 50%, d) wear 75%

Table 2. Results of calculating the effective coefficient of friction of a steel-composite pair

Wear, %	Fiberglass friction coefficient		CFRP coefficient of friction	
	FEM analysis (6)	Rule mixture (7)	FEM analysis (6)	Rule mixture (7)
0	0.192	0.12	0.116	0.12
25	0.246	0.427	0.165	0.14
50	0.234	0.481	0.145	0.145
75	0.207	0.427	0.103	0.14

stresses in the fiber and the matrix, a fairly local unloading is observed in the vicinity of the contact point between the fiber and the matrix.

Table 2 presents the results of calculating the effective friction coefficient of unidirectional glass and carbon fiber tetragonal structures during numerical simulation using FEM analysis (6) and according to the rule of the mixture (7) for a steel-composite friction pair. The volume fraction of fiber in the composite is an invariable parameter and, when calculated according to formula (7), the amount of wear does not affect the result according to the rule of the mixture. So for fiberglass with a fiber volume fraction of 71.5%, formula (7) gives an estimate of the friction coefficient of 0.392, for carbon fiber with a fiber volume fraction of 55%, the friction coefficient according to the mixture rule (7) is 0.137. In [12], it is recommended, instead of the volume fraction of fiber or matrix, to use the relative fraction of fiber or matrix in the steel-composite contact zone. The calculation results presented in Table 2 for the mixture rule were also performed using the relative fraction of the fiber or matrix content in the steel-composite contact zone.

As a result, the contact interaction problem for unidirectional fiber polymer composites of a tetragonal structure with a uniform elastic body was solved, the change in the effective friction coefficients for a steel-composite pair during wear, as well as the distribution field of normal and contact stresses in the structure components of the composite material, were studied, the main conclusions on work results:

1. The tribological properties of unidirectional fiber composites in the reinforcement plane substantially depend on the proportion of material wear. The rule of the mixture does not always allow us to evaluate the change in tribological characteristics with accuracy sufficient for practical purposes.

2. Tribological properties are determined by the structure of the inhomogeneous material in the contact zone and the corresponding distribution of structural stress fields. The rule of the mixture, even modified taking into account the relative fraction of fiber and matrix in the contact zone, does not allow this feature to be taken into account.

3. Using models of the mechanics of composites allows you to create a heterogeneous structure with an effective coefficient of friction, the value of which cannot be achieved at the level of the tribological properties of the individual components of the structure.

## References

[1] Sokolkin Y.V., Tashkinov A.A. *Deformation and Fracture Mechanics of Structurally Inhomogeneous Bodies*, Moscow, Nauka, 1984, 115 p. (in Russian)

- [2] Makarova E. Yu., Sokolkin Yu. V., Chekalkin A. A. Structural-Phenomenological Models for Predicting of the Elastic Properties for High-Pore Composites, *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ., Ser. Fiz.-Mat. Nauki* [J. Samara State Tech. Univ., Ser. Phys. Math. Sci.], 2010, 5, 276–279
- [3] Sokolkin Yu.V., Chekalkin A.A., Babushkin A.V. Prediction of physical and mechanical properties of powder and reinforced with highstrength fibers of metallic materials. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tsvetnaya metallurgiya*. Moscow, 1995, 2, 53-57.
- [4] Golchin A., Simmons G.F., Glavatskih S., Prakash B. Tribological behaviour of polymeric materials in water-lubricated contacts, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2013, 1–16.
- [5] Du Gang, Cai Chilan, Haobin Tian. The research on the effect of SiO<sub>2</sub> and CF on the tensile and tribological properties of PI composite, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2015, 1–6.
- [6] Christopher J Dyson, Martin Priest, Malcolm F. Fox, Bill Hopkins. The tribological behaviour of carbon fibre reinforced polyaryletherketones (PAEKs) through their glass transitions, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2015, 1–15.
- [7] Liu Jian, Zhang Yongzhen, Du Sanming, Lu Fei. Effect of friction heat on tribological behaviors of Kevlar fabric composites filled with polytetrafluoroethene, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2015, 1–9.
- [8] Kragel'skii I.V., Dobychin M.N., Kombalov V.S. *Fundamentals of friction and wear calculations*, Moscow, Mashinostroenie, 1977, 526 p. (in Russian)
- [9] Vasiliev V. V., Protasov V. D., Bolotin V. V. *Composite materials: Reference book*, Moscow, Mashinostroenie, 1990, 512 p.
- [10] Dzh. Lyubin. *Handbook of composite materials*, Moscow, Mashinostroenie, 1988, 448 p.
- [11] Richardson M. *Promyshlennye polimernye kompozicionnye*, Moscow, Himiya, 1980. 472 p. London: EHplajd Sajens Pabliisher, 1977.
- [12] Kragel'skij I.V. *Coefficients of friction. Reference manual*, Moscow, MASHGIZ, 1962, 220 p.

DOI: 10.17516/1999-494X-0301

УДК 551.1/4

## **Oxidative Destruction of Vulcanized by Changing the Dispersion Composition of Oxidized Vulcanized**

**Milen Dimov<sup>a\*</sup> and Zhuldyz Smailova<sup>b</sup>**

*<sup>a</sup>Trakia University*

*Yambol, Bulgaria*

*<sup>b</sup>Kyzylorda University named after Korkyt Ata*

*Kyzylorda, Kazakhstan*

---

Received 05.11.2020, received in revised form 23.01.2021, accepted 21.03.2021

---

**Abstract.** The aim of the present work is to study the processes of oxidative destruction of waste vulcanizates (flakes) with nitric acid. The composition of the particles of the main reaction product was determined (oxidized vulcanized). The IR spectra of hexane and acetone extracts of the oxidized vulcanizates are also presented. It was found that the rubber component of the vulcanizates undergoes deep structural changes leading to the formation of products characterized by chemical heterogeneity.

**Keywords:** rubber chunks, coal, oxidative destruction, nitric acid.

---

Citation: Dimov M., Smailova Z. Oxidative destruction of vulcanized by changing the dispersion composition of oxidized vulcanized, J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2021, 14(2), 207-214. DOI: 10.17516/1999-494X-0301

---

## Окислительное разрушение вулканизатов при изменении дисперсионного состава окисленного вулканизата

Милен Димов<sup>а</sup>, Жулдыз Смаилова<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Университет Тракия

Болгария, Ямбол

<sup>б</sup>Кызылординский университет им. Коркыт Ата  
Казахстан, Кызылорда

**Аннотация.** Целью данной работы является изучение процессов окислительной деструкции устаревших вулканизатов азотной кислотой. Определен состав частиц основного продукта реакции (окисленный вулканизат). Также представлены ИК-спектры гексанового и ацетонового экстракта из окисленного вулканизата. Было обнаружено, что каучуковый компонент вулканизатов терпит глубокие структурные изменения, приводящие к получению продуктов, характеризующихся химической неоднородностью.

**Ключевые слова:** пласты резины, уголь, окислительное разрушение, азотная кислота.

Цитирование: Димов, Милен. Окислительное разрушение вулканизатов при изменении дисперсионного состава окисленного вулканизата / Милен Димов, Жулдыз Смаилова // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2021, 14(2). С. 207-214. DOI: 10.17516/1999-494X-0301

### Introduction

The ability of a macromolecule to take part in various reactions (chemical, electro- and photochemical, mechanical, thermal) facilitated the development of a number of research directions related to their application. One of these directions is the no-waste chemical technology with further recovery, modification or utilization to different extents the polymers after their initial use. In this respect, one method for utilization of the waste polymers is the preparation of new products from them by their interaction with nitric acid [1–3].

It has been found that nitrating, oxidative and destructive processes occur by the interaction of polymers with nitric acid which, depending on reaction conditions, produce polyfunctional products (PFP) and low molecular weight compounds (LMWC) with different yields [4–6].

In all cases of interaction of vulcanizate with nitric acid, the main product obtained is oxidized vulcanizate which is a mixture of polyfunctional organic products and technical charcoal (carbon black). The low molecular weight organic acids remain in the nitric acid solution and can be extracted from there at yields about 10% [7–11].

### Experimental

The aim of the present work is to obtain information about the oxidation-reduction processes by studying the dispersion composition of the oxidized vulcanizates (OV).

It can be assumed that the relative decrease of the particle size during the interaction results from the destructive processes taking place while their agglomeration – to the structuring processes. The studies of these two processes was carried out indirectly by varying the mass of the equal sized

particles, the two fractions of OV obtained by interaction of nitric acid with three fractions of flakes from waste automobile tyres.

Fig. 1 shows the mass of the three summary OV fractions depending on the duration of the interaction. It can be seen from the figure that the masses of all the three fractions continuously decreased as a result of the destructive processes taking place which give low molecular weight products.

Fig. 2 shows three fractions of oxidized vulcanizate obtained by oxidizing initial fraction of flakes sized 0.80–0.63 mm depending on the duration of the oxidation. Curve 1 in the figure illustrates the total reduction of the mass of OV fraction up to 0.80 mm, curve 2 – OV fraction with particle size 0.80–0.63 mm and curve 3 – OV fraction with particle size smaller than 0.63 mm. As can be seen from Fig. 2, as early as the first 5 min the amount of fraction 0.80–0.63 mm decreased from 100% to 27%. At the same time, the amount of the fraction with particle size smaller than 0.63 mm increased from 0% to 53%. During the next 30 min, the amount of fraction 0.80–0.63 mm (curve 2) sharply increased

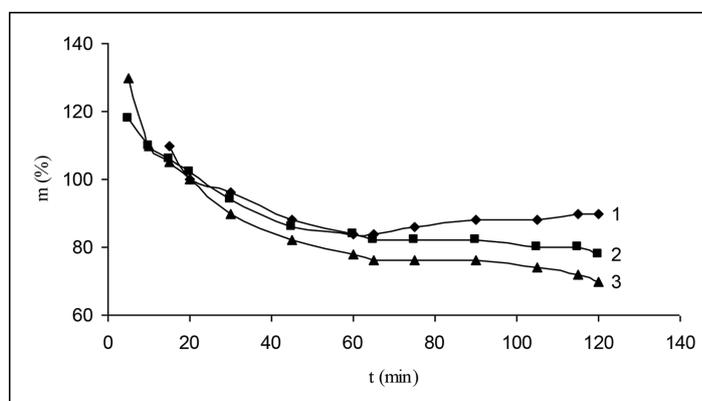


Fig. 1. Amount of oxidized vulcanizate (OV) depending on the oxidation duration of waste tyre flakes at ratio 1:40 mass parts and temperature 60 °C. Curve 1 – fraction 0.80–0.63 mm; Curve 2 – fraction 0.50–0.40 mm; Curve 3 – fraction 0.40–0.25 mm

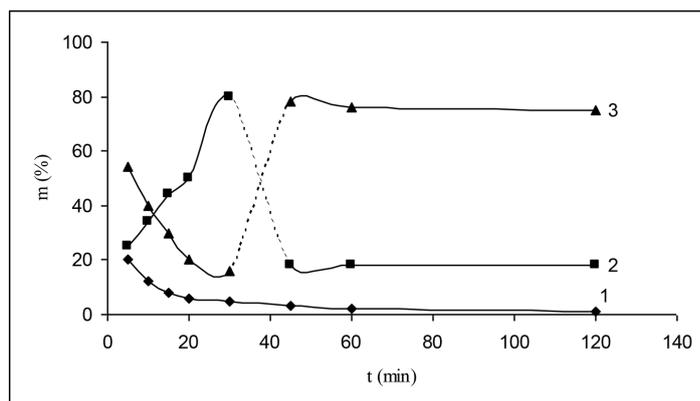


Fig. 2. Change of the dispersion composition of OV obtained after the interaction between OV flakes with nitric acid depending on the interaction duration. Curve 1 – OV fraction with size 1.00–0.80 mm; Curve 2 – OV fraction with size 0.80–0.63 mm; Curve 3 – OV fraction with size smaller than 0.63 mm

while the fraction with particle size smaller than 0.63 mm decreased. Based on these results, it can be assumed that during the first 5 min of interaction between the flakes and the nitric acid, the destructive processes predominate over the others which results in strong breakdown of the particles. Later on within 30 min the structuring processes begin to prevail and as a result the broken down particles obtain higher reaction area and agglomerate. For this reason, the fraction with particle size smaller than 0.63 mm decreased (curve 3) at the expense of fraction 0.80–0.63 mm (curve 2) which increased.

It should be noted that the initial decrease of fraction 0.80–0.63 mm during the first 5 min was due not only to the predominant destructive processes but also to the structuring processes which were weaker. They are manifested by the agglomeration of fraction 0.80–0.63 mm (curve 1). During the consequent 30 in, this fraction decreased because of the breaking down of th aggregates and it transforms into fraction 0.80–0.63 mm.

At higher periods of interaction between the flakes and the nitric acid, the shapes of curves 2 and 3 drastically changed. The mass of fraction 0.80–0.63 mm sharply decreased (curve 2) while the fraction with particle size smaller than 0.63 mm sharply increased its mass. It can be assumed that internal volume interaction takes place in the aggregates forming fraction 0.80–0.63 mm after 30 min, i.e. the destructive processes occur not only on aggregates' surface but also within them. As a result, new secondary breakdown takes place. Up to 120 min of the interaction between the flakes and the nitric acid, the fraction 0.80–0.63 mm (curve 2) and the fraction with particle size smaller than 0.63 mm (curve 3) did not change their mass.

Fig. 3 presents three fractions of oxidized vulvanizate obtained by interaction of fraction of flakes with particle size 0.50–0.40 mm with nitric acid depending on the interaction duration. The fractions had sizes up to 0.50 mm (curve 1), 0.50–0.40 mm (curve 2) and smaller than 0.40 mm (curve 3). It can be seen from the figure that the curves illustrating the change of the masses of the corresponding fractions have shapes similar to that shown in Fig. 2. Similarly, during the first 5 min of the interaction the mass of OV with particle size 0.50–0.40 mm decreased from 100% to 14%. The masses of the fractions with particle size up to 0.50 mm and smaller than 0.40 mm was 50% and 30%, respectively. Curve 3 (Fig. 3) describing the destructive processes indicates that until 15<sup>th</sup> minute of the interaction it

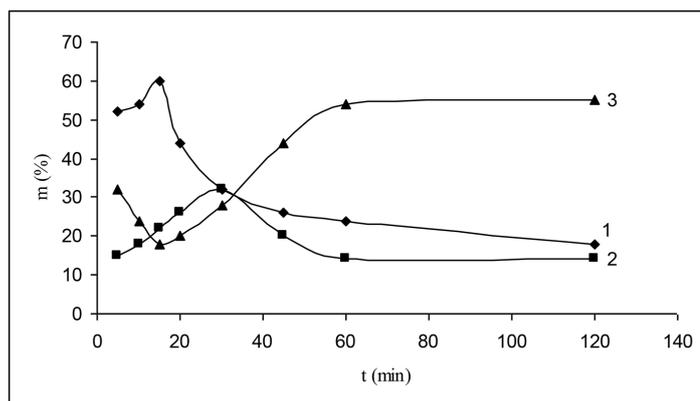


Fig. 3. Change of the dispersion composition of OV obtained by interaction between flakes and nitric acid (fraction 0.50–0.40 mm) depending on the duration of the interaction. Curve 1 – OV fraction with size 0.80 – 0.50 mm; Curve 2 – OV fraction with size 0.50–0.40 mm; Curve 3 – OV fraction with particle size smaller than 0.40 mm

slowed down while the structuring processes (curves 1 and 2) became stronger. The particles with sizes smaller than 0.40 mm agglomerate thus entering the fraction with size 0.50–0.40 mm which, in turn, agglomerate into bigger aggregates (the mass of the fraction with size smaller than 0.50 mm increases). It means that until that moment, the structuring process prevailing over the destructive ones. By the further interaction until 30<sup>th</sup> minute, the mass of the fraction with particle size smaller than 0.50 mm decreased at the expense of the increasing masses of the fractions with particle sizes 0.50–0.40 mm and smaller than 0.40 mm. These results indicate that the destructive process prevails over the structuring one. After 30 min of interaction, the destructive process which results in breakdown of the aggregates enhanced to significantly higher extent – the mass of the particles with sizes smaller than 0.40 mm increased to reach 60%. Simultaneously, the masses of the particles sized smaller than 0.50 mm and 0.50–0.40 mm decreased to about 15% during the consequent 120 min of the interaction.

The results obtained by sieve analysis of the oxidized vulcanizate obtained by interaction of fraction of flake with particle size 0.40–0.25 mm with nitric acid are presented in Fig. 4. As can be seen from the figure, the structuring process is the dominant one during the first 30 min. Curve 1 in the figure which illustrates the particles agglomeration is increasing. Simultaneously, curve 2 which shows the mass of the fractions of OV with particle size 0.40–0.25 mm is constantly decreasing. In this period of time and under these conditions, the destructive process is weaker (curve 3). At longer interaction periods of 60 min, agglomerate breakdown became the dominant process. The mass of the fraction with particle size higher than 0.40 mm decreased (curve 1) while that of fraction 0.40–0.25 mm increased (curve 2). At the same time, a small increase of the mass of with particle size smaller than 0.25 mm was observed (up to 20%, curve 3) which indicates that the destruction of the agglomerates results in formation of even smaller particles. By the interaction of the flakes with nitric acid from 60 to 120 min, no significant change of the curves' shape was observed.

Summarizing the results presented in Fig. 2–4, it can be seen that the intensity of the destructive and structuring processes strongly depends on the fraction composition of the initial components. For flakes of fraction 0.80–0.63 mm, the destructive process is the dominant one during the first period of interaction with nitric acid but its intensity gradually decreased while the structuring process became

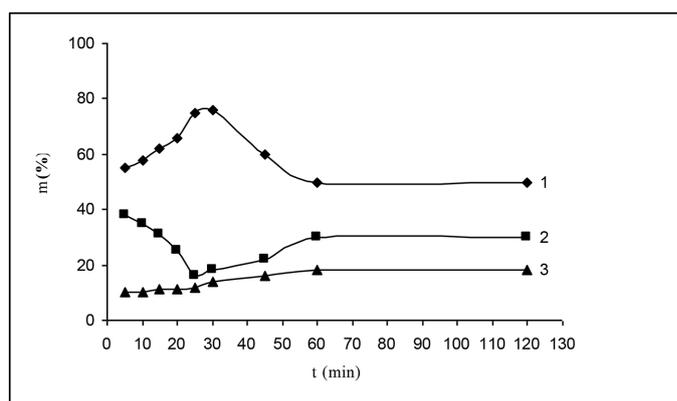


Fig. 4. Change of the dispersion composition of OV obtained by interaction of flakes with nitric acid (fraction 0.40–0.25 mm) depending on the duration of the interaction. Curve 1 – OV fraction with size 0.63 – 0.40 mm; Curve 2 – OV fraction with size 0.40–0.25 mm; Curve 3 – OV fraction with size smaller than 0.25 mm

more intense. For flakes of fraction 0.40–0.25 mm which are characterized by significantly higher surface area at the initial moments of its interaction with nitric acid, the structuring processes are definitely the dominant ones which gradually decrease by intensity but anyway remain dominant until the end of the reaction time (120 min). After 60 min of interaction, the percent part of the three OV fractions (Fig. 2–4) remained the same.

The results obtained from the extraction of individual fractions of OV with acetone and hexane indicated that the rubber component in the vulcanizate had undergone deep structural changes which lead to the formation of polyfunctional products.

Fig. 5 shows the spectra of hexane and acetone extracts of OV with particle size up to 0.80 mm obtained from initial flakes of fraction 0.80–0.63 mm. In both spectra, the functional groups characteristic for

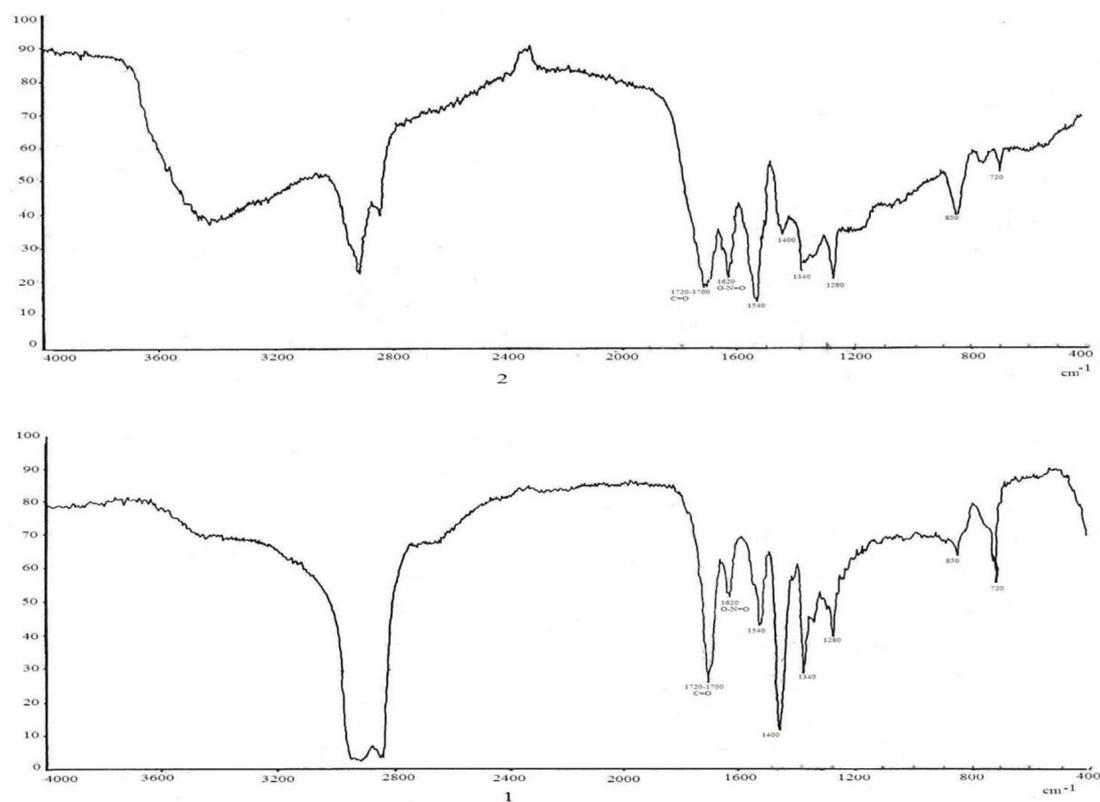


Fig. 5

these products are present: carbonyl group  $1750\text{ cm}^{-1}$ , nitrate-ester group at  $1630\text{ cm}^{-1}$ , antisymmetric and symmetric valent vibration of the nitro group at  $1540\text{ cm}^{-1}$  and  $1380\text{ cm}^{-1}$ .

It is interesting to note that in the spectrum of the acetone extract (spectrum 2) the maximum of the absorption corresponding to the nitro group had intensity higher than that corresponding to the carbonyl group. In the spectrum of the hexane extract (spectrum 1), the ratio of the intensities of these two bands was the opposite. It means that the hexane extract was obtained from a product which was at earlier stage of the oxidative destruction of the rubber component.

### Conclusion

1. The following conclusions can be made on the basis of the results obtained.
2. The interaction between nitric acid and flakes of waste tyres characterized by relatively monodispersed nature leads to the formation of oxidized vulcanizate (OV) with polydispersed granulometric composition.
3. It was proved that the polydispersed composition of the oxidized vulcanizate is a result of simultaneous processes of destruction and structuring. The dominance of one process over the other strongly depends on the contact surface of the particles, temperature and the amount of oxidizer.
4. The rubber component of the vulcanizates undergoes deep structural changes leading to the formation of products characterized by chemical heterogeneity.

### References / Список литературы

- [1] Tsaikova S., Bojadjiev N., Bajdarov D. *Die Angevengte makromolekulare chemie*, 1986, 1391, 39–48.
- [2] Цайкова С., Бояджиев Н., Младенов И. Журнал прикладной химии, 1985, 11, 2592–2595. [Tsaikova S., Boiadjiev N., Mladenov I. *Journal of Applied Chemistry*, 1985, 11, 2592–2595. (in Russian)]
- [3] Цайкова С. Международна конференция “Каучук и резина”, Москва, 27.09–01.10, 1994, 3, 671–680. [Tsaikova S. International Conference „Rubber and Retsina“, 27.09–01.10, 1994, 3, 671–680. (in Russian)]
- [4] Димов М. Взаимодействие на отпадъчни протекторни вулканизати с азотна киселина. XXVII Международна научна конференция, Наука и Технологии, 1–2 юни 2017, Ст. Загора. [Dimov M. Interaction of nitric acid with rubber chunks derived from waste tires, on-line journal, «Science and Technologies» Publisher «Union of Scientists – Stara Zagora», VII, number 3, 2017, Natural and Mathematical science, 137–141 (in Bulgaria)]
- [5] Милен Димов, Иван Димов, Ира Танеева. Фракционен Състав на Окислен Вулканизат и Изследване на Възможностите за Приложение на Някои Негови Екстракти. XXVIII Международна научна конференция, Наука и Технологии, 31 май – 1 юни 2018, Ст. Загора. [on-line journal, «Science and Technologies» Publisher «Union of Scientists – Stara Zagora», VIII, 3, 2018, Natural and Mathematical science, 62–69. (in Bulgaria)].
- [6] Милен Димов. Съвременен начин за оползотворяване на гумени отпадъци. Международна научна конференция – управление и образование, VIII (4), 2012, 173–176, гр. Бургас, у-т “Проф. д-р Асен Златаров”. [Milen Dimov. Contemporary method for utilization of rubber wastes. Management and Education, VIII (4), 2012, 173–176, Burgas (in Bulgaria)].
- [7] Авторско свидетелство, № 20483, България. [Inventor’s Certificatein No. 20483 (in Bulgaria)].
- [8] Генов Г., Младенов Ив. Юбелейна научна сесия на ВХТИ. Бургас, 4–6.10.1974. България. [Genov G., Mladenov Iv. Anniversary Scientific session of Higher Chemistry Technological Institute. Burgas, 4–6.10.1974. (in Bulgaria)]
- [9] Dimov M., Stoeva S., Tsaikova S. Interaction of Nitric Acid with Rubber Chunks Derived From Waste Tires. *Oxidation Communications*, 2008. 31 (4), 931–941.

- [10] Цайкова С., Бояджиев Н. Известия высших учебных заведений, 30 (1), 1987, 98–102.  
[Tsaikova S., Boiadjiev N. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii*, 30 (1), 1987, 98–102. (in Russian)]
- [11] Цайкова С., Баяджиев Н. Азербайджанский химический журнал, 1986, 1, 54–56.  
[Tsaikova S., Boiadjiev N. *Azerbaijani chemical journal*, 1986, 1, 54–56. (in Russian)]

DOI: 10.17516/1999-494X-0302

УДК 678

## The Effect of Vulcanization Accelerator on the Properties of Porous Rubber

**Kymbat S. Zhansakova\***,  
**Gregory S. Russkikh and Evgeny N. Eremin**  
*Omsk State Technical University*  
*Omsk, Russian Federation*

Received 12.12.2020, received in revised form 15.02.2021, accepted 11.03.2021

**Abstract.** This work is devoted to identifying the patterns of influence of the vulcanization accelerator N-cyclohexyl-benzothiazyl-sulfenamide (CBS) on the technological, physico-mechanical, and thermo-physical properties of vulcanizates based on styrene-butadiene rubber. It was found that a decrease in the content of the vulcanization accelerator decreases the maximum torque, and a noticeably longer time is required for optimum vulcanization in the absence of CBS. The thermal conductivity in vulcanizates increases with a decrease in the accelerator concentration due to changes in the structure and molecular mobility of kinetic units. Physico-mechanical indicators increase with a decrease in the concentration of CBS, this is due to a decrease in the apparent density of porous rubbers.

**Keywords:** vulcanization, rubber, porophore, vulcanization accelerator, sulfenamide C, pore formation.

Citation: Zhansakova K.S., Russkikh G.S., Eremin E.N. The effect of vulcanization accelerator on the properties of porous rubber, J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2021, 14(2), 215-221. DOI: 10.17516/1999-494X-0302

## Влияние ускорителя вулканизации на свойства пористых резин

**К. С. Жансакова, Г. С. Русских, Е. Н. Еремин**  
*Омский государственный технический университет*  
*Российская Федерация, Омск*

**Аннотация.** Данная работа посвящена выявлению закономерностей влияния ускорителя вулканизации сульфенамида Ц на технологические, физико-механические и теплофизические свойства вулканизатов на основе бутадиен-стирольного каучука. Установлено, что снижение содержания ускорителя вулканизации уменьшает максимальный крутящий момент, а оптимальное

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

\* Corresponding author E-mail address: chemistbox@mail.ru

время вулканизации заметно увеличивается при отсутствии сульфенамида Ц. Теплопроводность в вулканизатах увеличивается с уменьшением концентрации ускорителя из-за изменения структуры и молекулярной подвижности кинетических единиц. Физико-механические показатели растут с уменьшением концентрации сульфенамида Ц, это связано с уменьшением кажущейся плотности пористых резин.

**Ключевые слова:** вулканизат, каучук, порофор, ускоритель вулканизации, сульфенамид Ц, порообразование.

Цитирование: Жансакова, К. С. Влияние ускорителя вулканизации на свойства пористых резин / К. С. Жансакова, Г. С. Русских, Е. Н. Еремин // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2021, 14(2). С. 215-221. DOI: 10.17516/1999-494X-0302

## Введение

Рецептуростроение резиновых смесей является сложным видом деятельности, направленным на улучшение свойств вулканизатов. В зависимости от требуемых характеристик можно получить материалы различного спектра назначения. Так, для получения пористых резин очень важно согласование скорости порообразования и оптимального времени вулканизации.

В качестве полимерной матрицы пористых резин используются каучуки общего и специального назначения. Кроме того, в состав вулканизата входят наполнители, вулканизирующая система, стабилизирующая система и специальные компоненты [1].

Наполнители для пористых резин должны быть инертными или малоактивными, с небольшой удельной поверхностью. А вулканизирующая система обычно состоит из вулканизирующего агента, ускорителя и активатора вулканизации. Наиболее популярным вулканизирующим агентом является сера. При определенном давлении и температуре она связывается с молекулами каучука, в результате происходит «сшивание» полимера и образуются серные «мостики». Продукт имеет сетчатую структуру и именуется эластомером (вулканизатом).

Для лучшего диспергирования ингредиентов и повышения степени сшивания каучука вводят различные активаторы вулканизации. Они могут быть органическими и неорганическими. В качестве органических активаторов используют жирные кислоты (стеариновая, олеиновая), а в качестве неорганических активаторов применяют оксиды металлов (цинка, магния) [2].

Отдельное внимание стоит уделить ускорителям вулканизации. Они более сложные по химическому составу, гораздо разнообразнее по классификации и играют одну из важных ролей в процессе вулканизации. Данный ингредиент способствует улучшению физико-механических свойств и ускорению процесса вулканизации. В зависимости от химической природы ускорители разделяются на следующие группы:

- дитиокарбоматы – продукты на основе солей дитиокарбаминовых кислот;
- тиурамсульфиды – продукты окисления дитиокарбоната натрия оксидами азота или продукты его взаимодействия с фосгеном;
- тиазолы – продукты конденсации анилина с сероуглеродом и серой в присутствии нитробензола;
- сульфенамиды – окисление продуктов взаимодействия меркаптобензтиазола с амином;
- гуанидины – продукты взаимодействия аммиака и производных тиомочевины;
- альдегидамины – продукты конденсации альдегидов жирного ряда с ароматическими или алифатическими аминами;

– ксантогенаты – продукты взаимодействия сероуглерода со спиртами в присутствии щелочи [3].

Пропорции введения могут быть различными. В зависимости от содержания ускорителя и серы существуют три типа вулканизирующих систем, представленных в табл. 1 [4]. В зависимости от сферы применения готового изделия для пористых резин могут использоваться все типы вулканизационных систем.

Содержания вулканизирующего агента и ускорителя вулканизации варьируют относительно друг друга [5–8]. В то же время использованию в качестве ускорителя вулканизации сульфенамида Ц в пористых резинах уделяется явно недостаточное внимание.

Поэтому исследования влияния концентраций ускорителей вулканизации на свойства пористых резин актуальны.

Цель работы – выявление закономерностей влияния ускорителя вулканизации сульфенамида Ц на технологические, физико-механические и теплофизические свойства вулканизатов на основе бутадиен-стирольного каучука (СКМС-30АРКПН).

Объектами исследования являлись резиновые смеси и вулканизаты на основе бутадиен-стирольного каучука с различным содержанием ускорителя вулканизации сульфенамида Ц. Рецепты резиновых смесей представлены в табл. 2. В качестве эталона был взят рецепт для бутадиен-стирольных пористых резин [9].

Таблица 1. Классификация вулканизирующих систем

Table 1. Classification of vulcanization systems

Тип системы	Содержание серы, мас. ч.	Содержание ускорителя, мас. ч.	Ускоритель/сера
Серная (стандартная)	2,0–3,5	1,2–0,4	0,1–0,6
Полуэффективная	1,0–1,7	3,5–1,2	0,7–2,5
Эффективная	0,4–0,8	5,0–2,0	2,5–12,0

Таблица 2. Рецептура резиновой смеси

Table 2. Test compound formulation

	Эталон	1	2	3
Наименование ингредиента	Содержание, мас. ч., на 100 мас. ч. каучука			
Каучук СКМС-30АРКПН	100,0			
Технический углерод П803	40,0			
Оксид цинка, ZnO	3,0			
Сульфенамид Ц, CBS	1,5	0	0,5	1,0
Пластификатор ХП-470А	40,0			
Диафен ФП	2,0			
Сера	2,5			
Азодикарбонамид, ЧХЗ-21	6,5			
Всего:	195,5	194,0	194,5	195,0

Изготовление резиновых смесей проводили на лабораторных вальцах типа LRMR-SC-150/O с фрикцией валков 1:1,14, при температуре 50 °С. Вулканизацию проводили в два этапа. На первом этапе проводили подпрессовку при давлении 0,25 МПа температуре 165 °С в течение 5 мин. Второй этап – непосредственно изготовление без приложения давления, температура 165 °С в течение оптимального времени вулканизации. Для изготовления вулканизатов использовали гидравлический пресс марки Joos-Quality-Press.

Технологические свойства определяли с помощью безроторного виброреометра D-RPA 3000 при температуре 160 °С в течение 120 мин в соответствии с методикой ASTM D5289–17. Теплофизические свойства измеряли с применением прибора ИТС-1 в соответствии с методикой ГОСТ 7076. Для выявления физико-механических свойств использовали разрывную машину марки zwick/goell, скорость растяжения 500 мм в минуту, испытание проводили в соответствии с методикой ГОСТ 11721. Кроме того, устанавливали сопротивление сжатию образцов в соответствии с методикой ГОСТ 20014 при 50%-ной степени сжатия от максимальной высоты образца, время выдержки образца в сжатом состоянии 60 +/- 6 с. Кажущуюся плотность определяли в соответствии с методикой ГОСТ 409.

### Результаты экспериментов и их обсуждение

Результаты влияния содержания ускорителя вулканизации на свойства резиновых смесей и вулканизатов приведены в табл. 3.

По результатам испытаний видно, что плотность сшивки полимера (разность крутящих моментов) максимальная в эталонном образце. Полученные данные коррелируют с содержанием ускорителя вулканизации и подтверждают наличие дополнительных связей между вулканизирующей системой и каучуком. Время начала вулканизации характеризует способность резиновой смеси к преждевременной вулканизации. Полученные результаты не значительно различаются между собой.

Оптимальное время вулканизации самое большое у образца без ускорителя вулканизации, показатели остальных вулканизатов близки к эталонному образцу. Отсюда можно прийти к заключению, что для эффективного снижения оптимального времени вулканизации достаточно ввести небольшое количество (от 0,5 мас. ч.) сульфенамида Ц.

Исследуя полученные результаты теплопроводности, стоит отметить, что данное свойство зависит от марки каучука, марки наполнителя и его содержания, а также от количества оксида цинка [10]. Учитывая, что в данных вулканизатах варьировало только содержание ускорителя вулканизации, можно прийти к выводу, что структура и молекулярная подвижность кинетических единиц определяют теплофизические свойства образцов [11]. Поэтому с уменьшением содержания сульфенамида Ц теплопроводность увеличивается.

Уменьшение количества ускорителя вулканизации снижает условное напряжение при 300%-ном удлинении, увеличивает прочность при растяжении и относительное удлинение при разрыве. Полученные данные коррелируют с результатами при сжатии. В то же время введение ускорителя вулканизации в обычных вулканизатах увеличивает физико-механические показатели. В случае пористых резин наблюдается противоположная картина.

Стоит учесть, что во время серной вулканизации без ускорителя образуются полисульфидные поперечные связи. С добавлением сульфенамида Ц, кроме полисульфидных, образу-

Таблица 3. Результаты испытаний

Table 3. Results of testing

	Эталон	1	2	3
Технологические свойства				
Минимальный крутящий момент, дН·м	0,13	0,08	0,12	0,18
Максимальный крутящий момент, дН·м	10,79	6,74	8,12	9,08
Разность крутящих моментов, дН·м	10,66	6,66	8,00	8,90
Время начала вулканизации, мин	5,80	6,54	7,18	6,44
Время достижения 50%-ной степени вулканизации, мин	14,57	14,55	13,54	12,18
Оптимальное время вулканизации (t90), мин	24,07	32,09	22,32	19,26
Показатель скорости вулканизации, мин <sup>-1</sup>	5,47	3,91	6,61	7,80
Теплофизические свойства				
Теплопроводность, Вт/м·К	0,0851	0,1222	0,1502	0,1333
Физико-механические свойства				
Условное напряжение при 100%-ном удлинении, МПа	0,23	0,28	0,22	0,21
Условное напряжение при 200%-ном удлинении, МПа	0,50	0,48	0,39	0,35
Условное напряжение при 300%-ном удлинении, МПа	0,84	0,71	0,58	0,51
Прочность при растяжении, МПа	0,99	2,13	1,65	1,40
Относительное удлинение при разрыве, %	351,1	743,5	722,9	689,0
Сила сжатия, Н	190,02	394,95	325,5	509,98
Сопrotивление сжатию, МПа	0,216	0,445	0,387	0,575
Кажущаяся плотность, кг/м <sup>3</sup>	381,87	506,52	521,69	593,37

Таблица 4. Энергия связи для различных типов поперечных сшивок [12, 13]

Table 4. Bond energy for various types of cross-linking [12, 13]

Тип связи	Схематическое изображение	Энергия связи, кДж/моль
Полисульфидная	-C-S <sub>n</sub> -C-	<270
Дисульфидная	-C-S-S-C-	270
Моносульфидная	-C-S-C-	285
Углерод-углеродная	-C-C-	350

ются еще и углерод-углеродные, моно- и дисульфидные поперечные связи. Такие типы сшивок характеризуются более высокими энергиями связи, указанными в табл. 4.

Полученные результаты показывают, что чем выше энергия связи, тем лучше протекает порообразование азодикарбонида. Пористость эластомера увеличивается, и кажущаяся плотность уменьшается.

### Заключение

Установлено, что снижение содержания ускорителя вулканизации уменьшает максимальный крутящий момент, а оптимальное время вулканизации заметно увеличивается при отсутствии сульфенамида Ц.

Теплопроводность в вулканизатах увеличивается с уменьшением концентрации ускорителя из-за изменения структуры и молекулярной подвижности кинетических единиц.

Физико-механические показатели растут с уменьшением концентрации сульфенамида Ц, это связано с уменьшением кажущейся плотности образцов.

### Список литературы / References

- [1] Марк Дж., Эрман Б., Эйрич Ф. *Каучук и резина. Наука и технология*, Долгопрудный: Интеллект, 2011. 768 с. [Mark J., Erman B., Eirich F. *Science and technology of rubber*, Dolgoprudnyi, Intelligence, 2011, 768 p. (in Russian)]
- [2] Рагулин В. В., Вольнов А. А. *Технология шинного производства*, М.: Химия, 1981, 264 с. [Ragulin V. V., Volnov A. A. *Tire technology*, Moscow, Chemistry, 1981. 264 p. (in Russian)]
- [3] Новаков И. А., Вольсон С. И., Новопольцева О. М. *Реологические и вулканизационные свойства эластомерных композиций*, М.: Академкнига, 2006. 332 с. [Novakov I. A., Volson S. I., Novopoltseva O. M. *Rheological and vulcanizing properties of elastomeric compositions*, Moscow, Academic book, 2006, 332 p. (in Russian)]
- [4] Datta R. N. *Rubber curing systems*. *Rapra Rev. Rep.*, 2002, 12, 150 p.
- [5] Boonkerd K., Deeprasertkul C., Boonsomwong K. Effect of sulfur to accelerator ratio on crosslink structure, reversion and strength in natural rubber, *Rubber chemistry and technology*. 2016, 89(3), 450–464
- [6] Ghosh J., Ghorai S., Jalan A.K., Roy M., De.D. Manifestation of accelerator type and vulcanization system on the properties of silica-reinforced SBR/devulcanize SBR blend vulcanizates, *J. Advances in polymer technology*. 2018, 37, 2636–2650
- [7] Lee J. Y., Ahn B., Kim W., Moon H., Paik H. J., Kim W. The effect of accelerator contents on the vulcanizate structures of SBR/silica vulcanizates, *J. Composite interfaces*. 2016, 24(6), 1–15
- [8] Sainumsai W., Suchiva K., Toki S. Influence of sulphur crosslink type on the strain-induced crystallization of natural rubber vulcanizates during uniaxial stretching by in situ WAXD using a synchrotron radiation, *Materials today: Proceedings*. 2019, 17, 1539–1548
- [9] Берлин А. А. *Основы производства газонаполненных пластмасс и эластомеров*, М.: Госхимиздат, 1954. 194 с. [Berlin A. A. *Fundamentals of the production of gas-filled plastics and elastomers*, Moscow, Goskhimizdat, 1954, 194 p. (in Russian)]
- [10] Волков Д. П., Егоров А. Г., Мироненко М. Э. Теплофизические свойства полимерных композиционных материалов. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, 2017, 17(2), 287–293 [Volkov D. P., Egorov A. G., Mironenko M. E. Thermo-physical properties of polymer composite materials, *Scientific and Technical J. of Information Technologies, Mechanics, and Optics*, 2017, 17(2), 287–293 (in Russian)]
- [11] Шут Н. И., Лазоренко М. В., Сичкарь Т. Г. Взаимосвязь молекулярной подвижности и теплофизических свойств каучуков и вулканизатов. *Каучук и резина*, 1988, 8, 21–22 [Shut N. I.,

Lazorenko M. V., Sichkar T. G., The relationship of molecular mobility and thermophysical properties of rubbers and vulcanizates, *J. Kauchuk i Rezina* 1988, 8, 21–22 (in Russian)]

[12] Востриков Д. С., Бочкарев Е. С., Димитров П. В., Ваниев М. А. Исследование влияния эффективных вулканизирующих систем на свойства резин на основе бутадиен-нитрильного каучука. *Известия Волгоградского государственного технического университета*, 2019, 12 (235), 126–131 [Vostrikov D. S., Bochkarev E. S., Dimitrov P. V., Vaniev M. A. Study of the effect of effective vulcanizing systems on the properties of rubbers based on nitrile butadiene rubber, *J. Bulletin of the Volgograd State Technical University*, 2019, 12 (235), 126–131 (in Russian)].

[13] Ghorai S., Jalan A. K., Roy M., Das A., De. D. Turing of accelerator and curing system in devulcanized green natural rubber compounds, *Polymer testing*. 2018, 69, 133–145.

DOI: 10.17516/1999-494X-0303

УДК 678.049.92

## **Influence of the Content and Nature of the Plasticizer on the Properties of Butadiene-Nitrile Rubber**

**Valeriya V. Pavlova,  
Marina D. Sokolova and Aytalina F. Fedorova**  
*Institute of Oil and Gas Problems SB RAS  
FRC "Yakut Science Center"  
Yakutsk, Russian Federation*

Received 22.10.2020, received in revised form 16.01.2021, accepted 21.03.2021

**Abstract.** In this article investigates the effect of the content of plasticizers on the properties of rubbers based on rubber BNKS-18 AMN. The traditional, widely used dioctyl phthalate (DOP), as well as the more modern, environmentally friendly dioctyl terephthalate (DOTP), were used as plasticizers. It has been established that the introduction of plasticizers contributes to the production of rubbers with an improved complex of operational properties, such as elasticity, frost resistance, resistance to the corrosive media SZhR-3. At the same time, according to the research results, it was revealed that the introduction of plasticizers in an amount of 20 phr leads to the most noticeable improvement in these properties. In terms of physicomechanical and low temperature properties, the samples containing DOTP significantly exceed those of the samples containing DOP. Thus, our data showed that the use of DOTP is promising as an alternative to the widely used DOP.

**Keywords:** elastomers, frost resistance, nitrile butadiene rubber, plasticizer, physicomechanical properties.

Citation: Pavlova V.V., Sokolova M.D., Fedorova A.F. Influence of the content and nature of the plasticizer on the properties of butadiene-nitrile rubber, J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2021, 14(2), 222-232. DOI: 10.17516/1999-494X-0303

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

\* Corresponding author E-mail address: pavvaleriya-55@mail.ru

## Влияние содержания и природы пластификатора на свойства бутадиен-нитрильной резины

**В. В. Павлова, М. Д. Соколова, А. Ф. Федорова**

*Институт проблем нефти и газа СО РАН*

*ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН»*

*Российская Федерация, Якутск*

**Аннотация.** В данной статье исследовано влияние содержания пластификаторов на свойства резин на основе каучука БНКС-18 АМН. В качестве пластификаторов использованы традиционный, широко применяемый диоктилфталат (ДОФ), а также более современный, экологичный диоктилтерефталат (ДОТФ). Установлено, что введение пластификаторов способствует получению резин с улучшенным комплексом эксплуатационных свойств, таких как эластичность, морозостойкость, стойкость к среде СЖР-3. При этом по результатам исследований выявлено, что введение пластификаторов в количестве 20 масс.ч. приводит к наиболее заметному улучшению этих свойств. По физико-механическим и низкотемпературным свойствам образцы, содержащие ДОТФ, заметно превосходят показатели образцов, содержащих ДОФ. Таким образом, полученные нами данные показали перспективность применения ДОТФ в качестве альтернативы широко применяемому ДОФ.

**Ключевые слова:** эластомеры, морозостойкость, бутадиен-нитрильный каучук, пластификатор, физико-механические свойства.

Цитирование: Павлова, В. В. Влияние содержания и природы пластификатора на свойства бутадиен-нитрильной резины / В. В. Павлова, М. Д. Соколова, А. Ф. Федорова // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2021, 14(2). С. 222-232. DOI: 10.17516/1999-494X-0303

### Введение

Пластификация является одним из важнейших методов модификации свойств полимерных композиций. С развитием производства эластомерных материалов роль пластификаторов, применяемых при их переработке, значительно возросла. Введение пластификатора улучшает технологические свойства, способствует распределению сыпучих ингредиентов в резиновых смесях. Правильный выбор типа и количества пластификатора позволяет существенно повысить эластичность, морозостойкость, негорючесть, снизить теплообразование при многократных деформациях, сохранив при этом высокий уровень прочностных свойств. На выбор пластификаторов влияет ряд нескольких требований: они должны совмещаться с каучуком, обладать высокой химической стойкостью и высокой эффективностью пластифицирующего действия. Кроме того, как химические вещества, с которыми работает человек, они должны быть безопасными: нетоксичными, лишенными запаха и цвета и, наконец, пластификаторы должны иметь низкую стоимость.

Анализ литературных данных показал, что в отечественной резиновой промышленности вплоть до 1970 г. ассортимент пластификаторов и мягчителей был крайне ограниченным, но в последние годы начали внедряться новые современные пластификаторы. Доминирующую часть в производстве пластификаторов составляют эфиры о-фталевой кислоты (фталаты), они занимают более 80 % рынка российской промышленности. Первое место по выпуску и потреблению занимает диоктилфталат (ДОФ). Он хорошо совмещается с каучуками и обеспечивает

необходимые физико-механические и диэлектрические свойства резинам. Однако имеет повышенную летучесть и ухудшает огнестойкость резин. Морозостойкость резин обеспечивается лишь до минус 40 °С [1].

В настоящее время рынок пластификаторов и области их применения находятся под влиянием строгих директив по охране окружающей среды и здоровья человека. Регулирование осуществляется Европейским Советом по пластификаторам и интермедиятам (ЕСPI – European Council for Plasticizers and Intermediates). В результате проведенных испытаний применение ДОФ в Европе снижено в связи с негативным влиянием на организм человека (класс опасности – 2) [2]. Поэтому одной из актуальных задач является поиск альтернативы данному пластификатору. В последнее время уделяется особое внимание диоктилтерефталату (ДОТФ) как наиболее перспективному заменителю ДОФ благодаря аналогичным пластифицирующим свойствам при сравнимой стоимости. Также ДОТФ считается экологически безопасным (класс опасности – 3) [3].

В связи с этим представляло интерес рассмотреть возможность замены ДОФ в рецептуре стандартной резиновой смеси на ДОТФ. Цель данной статьи – подбор безопасного и перспективного пластификатора взамен широко применяемому, серийному пластификатору ДОФ, а также проведение сравнительных исследований влияния содержания и природы пластификаторов на эксплуатационные свойства резин на основе бутадиен-нитрильного каучука.

### Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования выбран бутадиен-нитрильный каучук марки БНКС-18 АМН. Изделия на основе данного каучука сочетают высокую маслостойкость и удовлетворительную морозостойкость [4, 5].

В таблице 1 приведены важнейшие показатели исследуемых пластификаторов ДОФ (Китай) и ДОТФ (Россия, ООО «СИБУР»). Данные приведены в соответствии с паспортами качества исследуемых пластификаторов.

Как известно [6], пластифицирующее действие пластификаторов зависит от химического строения, способности молекул к конформационным изменениям и термодинамического сродства пластификаторов к полимеру. Играет роль также природа атомов, входящих в молекулу, полярность связей, размер и форма молекул пластификатора. Если сравнить химическое стро-

Таблица 1. Сравнительная таблица показателей пластификаторов ДОФ и ДОТФ

Table 1. Comparative table of indicators of plasticizers DOP and DOTP

№	Показатель	ДОФ	ДОТФ
1	Молекулярная формула	$C_{24}H_{38}O_4$	$C_{24}H_{38}O_4$
2	Молекулярная масса, г/моль	390,56	390,56
3	Плотность при 20 °С, г/см <sup>3</sup>	0,9852	0,9813
4	Вязкость при 25 °С, МПа·с	54	63
5	$T_{всп}$ , °С	205	228
6	$T_{заст}$ , °С	-50	-48
7	Класс опасности	2	3

ение ДОФ и ДОТФ, то они отличаются лишь положением радикала в бензольном кольце, т.е являются структурными изомерами (орто- и пара-изомеры) (рис. 1).

Для оценки эффективности исследуемых пластификаторов разработаны рецептуры резиновых смесей с учетом рекомендованной стандартной смеси [7]. Содержание пластификаторов варьировалось от 0 до 20 масс.ч. на 100 масс.ч. каучука (табл. 2).

Смешивали компоненты на лабораторных вальцах См 350 150/150 (КНР) в течение 40 мин. Вулканизацию образцов проводили при температуре 155 °С в течение 20 мин на вулканизационном прессе 100–400 2Э (Россия).

Комплекс исследований пластифицированных резин включал следующие испытания: определение физико-механических свойств (ISO 37–2013), определение коэффициента морозостойкости при растяжении ( $K_M$ ) (GOST 408–78), определение твердости по А. Шору (ISO 48–4:2018), определение степени набухания в среде стандартной жидкости СЖР-3 (ISO 1817:2016).

Структурные исследования проведены с помощью растрового электронного микроскопа JEOL JSM 7800F (Япония) с ускоряющим напряжением в 2кВ. Исследование методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) осуществлено на низкотемпературных сколах образцов резин при помощи вторичных электронов.

Динамические испытания резин проведены на приборе RPA 2000 фирмы «AlphaTechnologies». Динамическое нагружение вулканизатов при разных частотах (от 0,1 до 20 Гц) проведено при температуре 80 °С и амплитуде деформации 10 %.

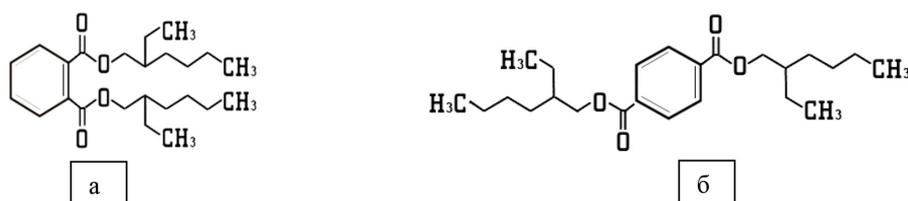


Рис. 1. Химическое строение пластификаторов: а – ДОФ; б – ДОТФ

Fig. 1. Chemical structure of plasticizers: a – DOP; б – DOTP

Таблица 2. Рецептуры резиновых смесей

Table 2. Rubber compounding formulations

№	Ингредиенты	Массовые части на 100 масс. ч. каучука						
		1	2	3	4	5	6	7
1	БНКС-18 АМН	100	100	100	100	100	100	100
2	ТУ N550	50	50	50	50	50	50	50
3	Пластификатор ДОФ	-	10	15	20	-	-	-
4	Пластификатор ДОТФ	-	-	-	-	10	15	20
5	Оксид цинка	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
6	Стеариновая кислота	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
7	Сера	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
8	Каптакс	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0

Дифференциальный сканирующий калориметр DSC204 HP/1/G Phoenix фирмы «NETZSCH» использовали для определения температуры стеклования образцов.

### Результаты и обсуждение

Результаты исследований физико-механических свойств резин на основе БНКС-18 АМН в зависимости от различного содержания пластификаторов ДОФ и ДОТФ представлены в табл. 3.

Данные табл. 3 показывают, что введение пластификаторов ДОФ и ДОТФ обеспечивает уровень допустимых значений эксплуатационных свойств для уплотнительных резин. Как видим, при введении пластификаторов в количестве 10 масс.ч. показатели условной прочности сопоставимы с показателями образца, в который не был введен пластификатор. С увеличением содержания пластификаторов в резинах наблюдается незначительное снижение прочностных показателей, а также снижение показателей напряжения при 100%-ном удлинении более чем в 2 раза. Предполагается [8], что существенное влияние на механические свойства пластифицированных полимеров оказывает механизм пластификации. Так, введение пластификатора, молекулярно распределенного между цепями полимера, приводит к увеличению свободного объема, пропорционального количеству пластификатора. Таким образом, снижение значений условной прочности опытных образцов резин с увеличением содержания пластификатора является закономерным эффектом. Показано, что пластифицированные образцы имеют существенно более высокие показатели относительного удлинения в отличие от непластифицированного. Известно [9], что введение пластификатора в резиновые смеси в большинстве случаев повышает данный показатель, так как происходит взаимодействие между полярными груп-

Таблица 3. Физико-механические свойства резин на основе БНКС-18 АМН с различным содержанием пластификаторов ДОФ и ДОТФ

Table 3. Physico-mechanical properties of rubbers based on BNKS-18 AMN with different content of DOP and DOTP

Содержание пластификаторов, масс.ч.	Обозначение смесей						
	1	2	3	4	5	6	7
ДОФ	0	10	15	20	-	-	-
ДОТФ		-	-	-	10	15	20
Свойства вулканизатов (155 °С×20 мин)							
TS <sub>б</sub> , МПа	20,0	19,4	17,1	16,9	19,8	17,6	15,7
S <sub>100</sub> , МПа	4,5	1,9	1,7	1,7	2,2	2,1	1,5
E <sub>б</sub> , %	402	516	609	690	633	652	703
H, Шор А	69	59	58	55	62	61	56
K <sub>М</sub> при -30 °С	0,22	0,37	0,42	0,44	0,42	0,44	0,51
K <sub>М</sub> при -40 °С	0,06	0,21	0,23	0,26	0,22	0,23	0,27
Q, % (70 °С×72 ч)	12,57	6,69	6,24	4,77	8,73	8,37	4,53

Примечание: S<sub>100</sub>, МПа – условное напряжение при 100%-ном удлинении; TS<sub>б</sub>, МПа – условная прочность; E<sub>б</sub>, % – относительное удлинение; K<sub>М</sub> – коэффициент морозостойкости при растяжении; Q, % – степень набухания в среде СЖР-3 при 70 °С в течении 72 часов; H, Шор А – твердость по А. Шору.

пами как самого бутадиен-нитрильного каучука БНКС-18, так и полярных групп пластификаторов ДОФ и ДОТФ, что влияет в целом на эластичность резин. В таких случаях с увеличением содержания пластификатора будут повышаться показатели относительного удлинения. В данной работе наибольшие показатели относительного удлинения наблюдаются у образцов, содержащих 20 масс.ч. пластификатора и ДОФ, и ДОТФ, что в 1,7 раз больше, чем у образца без пластификатора. Твердость образцов по А. Шору при введении пластификаторов с увеличением содержания пластификаторов снижается. Необходимо отметить, что существенного отличия для большинства исследованных физико-механических показателей резин, пластифицированных ДОФ и ДОТФ, при одних и тех же содержаниях введенного пластификатора не наблюдается. По-видимому, это объясняется тем, что они являются структурными изомерами ( $M=390,6$  г/моль). Однако заметное превосходство показателей относительного удлинения образцов, содержащих ДОТФ, над показателями образцов ДОФ возможно объяснить с точки зрения химического строения ДОТФ (рис. 1).

Исследование стойкости резин в среде СЖР-3 показало, что при введении пластификаторов с увеличением содержания пластификатора в образцах снижается степень набухания. Вероятно, это связано с тем, что наличие в составе образцов пластификаторов с более высокой молекулярной массой ( $M=390$  г/моль), чем молекулярная масса рабочей жидкости СЖР ( $M\approx 266$  г/моль), препятствует набуханию резин. Так, при введении 10 и 15 масс.ч. пластификатора ДОФ в образцы степень набухания снижается в 1,8 раза, при введении соответствующего количества пластификатора ДОТФ степень набухания – в 1,5 раза, а при введении 20 масс.ч. пластификаторов ДОФ и ДОТФ почти одинаково – в 2,7 раза.

Одним из основных назначений пластификаторов является улучшение низкотемпературных свойств, которые можно оценить с помощью коэффициента морозостойкости. По данным табл. 3 видно, что введение пластификаторов повышает морозостойкость исследуемых образцов резин. Так, коэффициент морозостойкости при минус 30 °С и при минус 40 °С у образцов, содержащих пластификаторы ДОФ и ДОТФ, значительно выше по сравнению с образцом без содержания пластификатора. Образцы, пластифицированные ДОТФ, имеют более высокие значения коэффициента морозостойкости, чем образцы, пластифицированные ДОФ. С увеличением содержания пластификаторов в образцах коэффициент морозостойкости увеличивается. У образцов, содержащих 20 масс.ч. пластификаторов ДОФ и ДОТФ, наблюдаются наибольшие показатели коэффициента морозостойкости. Как было отмечено ранее, морозостойкость резин, пластифицированных ДОФ (соответственно и ДОТФ), обеспечивается лишь до минус 40 °С, о чем свидетельствуют полученные данные. При минус 40 °С коэффициент морозостойкости у всех пластифицированных образцов сохраняется на уровне нормативного значения ( $K_M \geq 0,2$ ). Однако анализ термограммы, полученной методом ДСК (рис. 2), показал, что процесс стеклования образцов, содержащих 20 масс.ч. пластификаторов, начинается при минус 39,7 °С (ДОФ) и при минус 40,8 °С (ДОТФ).

Таким образом, выявлено, что введение пластификаторов и ДОФ, и ДОТФ в количестве 20 масс.ч. оптимально для получения резин с улучшенным комплексом эксплуатационных свойств, таких как эластичность, морозостойкость, стойкость к среде СЖР-3.

Введение пластификаторов в резиновые смеси не только улучшает эластические и низкотемпературные свойства резин, но и облегчает их переработку, повышает пластичность, спо-

способствует равномерному распределению дисперсных ингредиентов, уменьшению разогрева при смешении и снижает опасность подвулканизации. Для подтверждения данной гипотезы проведены исследования микроструктуры с помощью метода РЭМ, а также динамические испытания образцов резин на приборе RPA 2000. На основании вышеполученных результатов были отобраны следующие образцы: образец № 1 (табл. 2) – без содержания пластификатора (исходный образец), образец № 4 – содержащий 20 масс.ч. пластификатора ДОФ, и образец № 7 – содержащий 20 масс.ч. пластификатора ДОТФ. На рис. 3 представлены микрофотографии исследуемых образцов. Сравнительный анализ полученных изображений низкотемпературного скола образцов позволяет сделать следующие выводы. Видно, что поверхность (на сре-

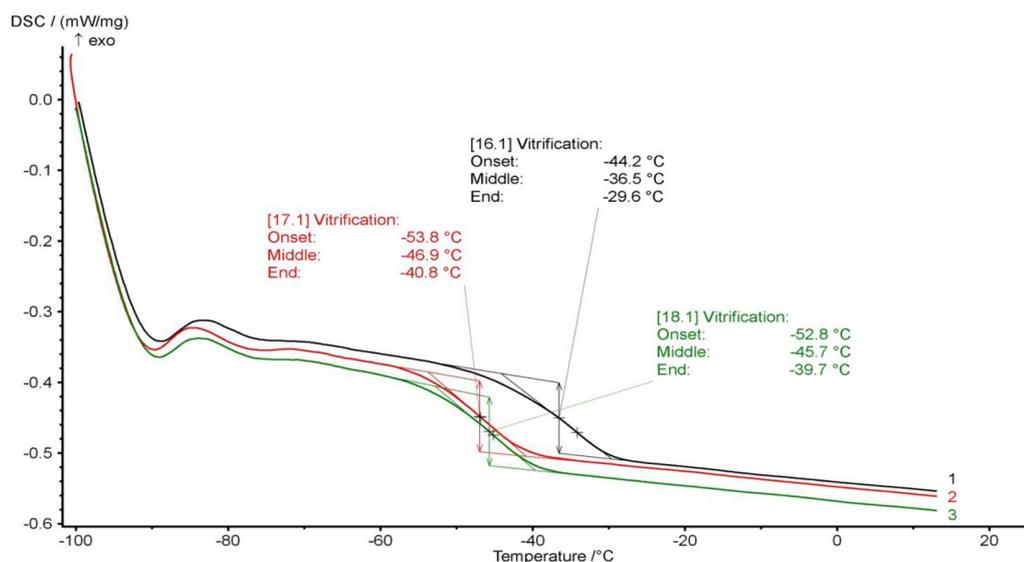


Рис. 2. Температуры стеклования образцов резин на основе БНКС-18 АМН: 1 – без пластификатора; 2 – с содержанием 20 масс.ч. ДОТФ; 3 – с содержанием 20 масс.ч. ДОФ

Fig. 2. Glass transition temperatures of rubber samples based on BNKS-18 AMN: 1 – without plasticizer; 2 – with a content of 20 phr DOTP; 3 – with a content of 20 phr DOP

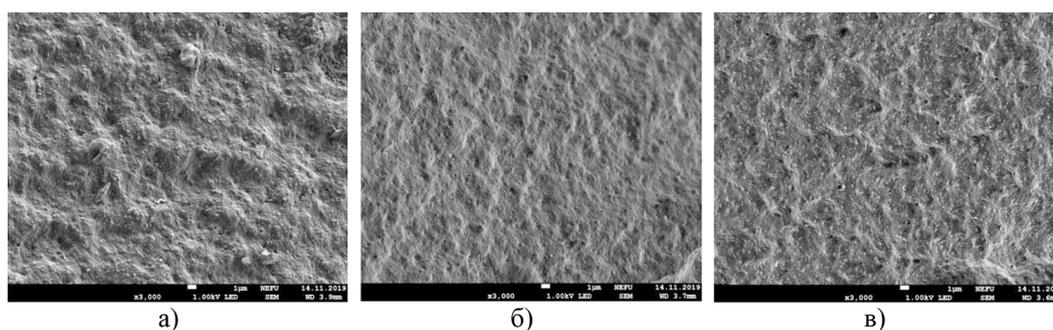


Рис. 3. Микрофотографии поверхностей сколов ( $\times 3000$ ) резин на основе БНКС-18 АМН: а – образец № 1 – без пластификатора; б – образец № 4 – с содержанием 20 масс.ч. ДОФ; в – образец № 7 – с содержанием 20 масс.ч. ДОТФ

Fig. 3. Micrographs of the surfaces of chips ( $\times 3000$ ) of rubbers based on BNKS-18 AMN: а – sample no. 1 – without plasticizer; б – sample no. 4 – with a content of 20 phr DOP; в – sample no. 7 – with a content of 20 phr DOTP

зе) исходного образца значительно отличается от поверхности пластифицированных образцов. Рельеф является недостаточно гладким, неоднородным, на нем наблюдаются отдельные частицы различной формы и размеров (при увеличении  $\times 3000$ ), что свидетельствует о том, что распределение ингредиентов в резиновой смеси происходит неравномерно. По сравнению с исходным образцом поверхность пластифицированных образцов более однородна, не наблюдаются отдельные частицы и, соответственно, происходит более равномерное распределение ингредиентов.

Равномерность распределения ингредиентов в смесях является не только характеристикой технологических свойств получаемых композиций, но и тем показателем, от которого зависят эксплуатационные свойства изделий. Улучшение качества смешения ингредиентов резиновой смеси оказывает благоприятное влияние на все свойства. При динамических измерениях на приборе RPA-2000 можно определять энергию, запасаемую в полимере и обратимо отдаваемую им в каждом цикле. Мерой этой энергии служит модуль накопления (эластичности)  $G'$ . Одновременно определяется доля энергии, рассеянной в единице объема материала за цикл деформирования. Эта часть сопротивления материала деформированию характеризуется модулем потерь  $G''$ . По результатам динамического испытания были построены кривые зависимости  $G'$  и  $G''$  от частоты нагружения (рис. 4). На рис. 4А видно, что введение пластификаторов в резину приводит к снижению модуля накопления вследствие уменьшения межмолекулярного взаимодействия макромолекул каучука за счет экранирования пластификатором полярных групп полимерной матрицы [10–12]. Причем вклад в повышение подвижности надмолекулярных структур обоих пластификаторов (ДОФ и ДОТФ) практически одинаков. Показано, что у всех вулканизатов происходит рост  $G'$  по мере увеличения частоты нагружения, т. е. происходит повышение сопротивления к циклическим воздействиям по мере роста частоты деформирования.

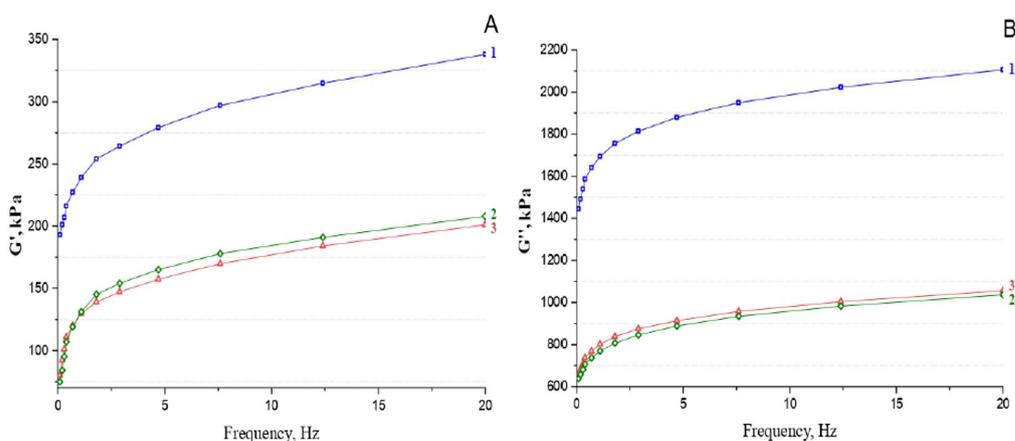


Рис. 4. Кривые зависимости модуля накопления (А) и модуля потерь (Б) резин на основе БНКС-18 АМН от частоты нагружения: 1 – без пластификатора; 2 – с содержанием 20 масс.ч. ДОФ; 3 – с содержанием 20 масс.ч. ДОТФ

Fig. 4. Curves of the accumulation modulus (A) and loss modulus (B) of rubbers based on BNKS-18 AMN on the loading frequency: 1 – without plasticizer; 2 – with a content of 20 phr DOP; 3 – with a content of 20 phr DOTP

При рассмотрении зависимостей  $G''$  от частоты нагружения видно (рис. 4Б), что значения модуля потерь всех исследованных образцов резин с увеличением частоты деформирования повышаются за счет потери энергии при разрыве и преобразовании связей наполнитель-наполнитель [13–15]. Причем отчетливо виден вклад пластификаторов в уменьшение сопротивления материала деформированию. Так образцы, содержащие ДОФ и ДОТФ, характеризуются низким модулем потерь, что можно объяснить уменьшением межмолекулярного взаимодействия между полярными группами бутадиен-нитрильного каучука при введении пластификаторов, вследствие чего повышается подвижность макромолекул.

### Выводы

1. Введение пластификаторов ДОФ и ДОТФ в резиновые смеси на основе БНКС-18 АМН способствует получению резин с улучшенным комплексом эксплуатационных свойств, таких как эластичность, морозостойкость, стойкость к среде СЖР-3. При этом по результатам исследований выявлено, что введение пластификаторов в количестве 20 масс.ч. приводит к наиболее заметному улучшению таких показателей резин, как относительное удлинение при разрыве, стойкость к углеводородным средам и морозостойкость. По физико-механическим и низкотемпературным свойствам образцы, содержащие ДОТФ, заметно превосходят показатели образцов, содержащих ДОФ.

2. Сравнительный анализ полученных изображений методом РЭМ показывает, что по сравнению с исходным образцом, не содержащим пластификатор, поверхность пластифицированных образцов является более однородной, не наблюдаются отдельные частицы и, соответственно, происходит более равномерное распределение ингредиентов в каучуковой матрице.

3. Результаты исследования динамических свойств образцов резин показали, что введение пластификаторов в резину приводит к снижению модуля накопления ( $G'$ ) и модуля потерь ( $G''$ ) вследствие уменьшения межмолекулярного взаимодействия макромолекул каучука за счет экранирования пластификатором полярных групп полимерной матрицы. Вклад обоих пластификаторов (ДОФ и ДОТФ) практически одинаков.

Таким образом, полученные нами данные показали перспективность применения ДОТФ в качестве альтернативы широко применяемому ДОФ.

### Благодарности / Acknowledgements

Работа выполнена в рамках Госзадания Министерства науки и высшего образования РФ № АААА-А17–117040710038–8.

This work was carried out within the framework of the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. АААА-А17–117040710038–8.

### Список литературы / References

- [1] Резниченко С.В., Морозов Ю.Л. *Большой справочник резинщика. Ч. 2. Резины и резинотехнические изделия*. М.: ООО «Издательский центр «Техинформ» МАИ», 2012. 648 с. [Reznichenko S. V., Morozov Y. L. *The great reference of rubberman. V. 2. Rubber and rubber products*. Moscow, Techinform MAI, 2012. 648 p. (in Russian)]

- [2] Лазарева В. А., Кучугурный В. Е., Бортникова Е. А. Пластификаторы: маркетинговый обзор. Черкассы: ГП «Черкасский НИИТЭХИМ», 2011. 478 с. [Lazareva V. A., Kuchugurnyy V. E., Bortnikova E. A. *Plasticizers: a marketing overview*. Cherkassy, Cherkassy NIITEKHIM, 2011. 478 p. (in Russian)]
- [3] Мамонов Р. А., Федотова Л. А., Печникова И. А., Потапченко Т. Д. Токсичность диоктил-терефталата. Токсикологический вестник, 2016, 6(153), 47–48. [Mamonov R. A., Fedotova L. A., Pechnikova I. A., Potapchenko T. D. Diocyltlerephtalate toxicity. *Toksikologicheskiy vestnik*, 2016, 6(153), 47–48 (in Russian)]
- [4] Соколова М. Д., Шадрин Н. В., Давыдова М. Л., Халдеева А. Р., Павлова В. В. Эластомерные материалы уплотнительного назначения для эксплуатации в условиях холодного климата России. Каучук и резина, 2018, 6, 402–409. [Sokolova M. D., Shadrinov N. V., Davydova M. L., Khaldeeva A. R., Pavlova V. V. Elastomeric materials for sealing purposes for operation in the cold climate of Russia. *Kauchuk I Rezina*, 2018, 6, 402–409 (in Russian)]
- [5] Аммосова О. А., Аргунова А. Г., Ботвин Г. В. и др. Модифицированные полимерные и композиционные материалы для северных условий. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. 217 с. [Ammosova O. A., Argunova A. G., Botvin G. V. et al. *Modified polymeric and composite materials for northern conditions*. Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, 2017, 217 p. (in Russian)]
- [6] Тагер А. А. Физико-химия полимеров. М.: Научный мир, 2007. 576 с. [Tager A. A. *Physico-chemistry of polymers*. M., Nauchnyy mir, 2007, 576 p. (in Russian)]
- [7] Корнев А. Е., Буканова А. М., Шевердяев О. Н. Технология эластомерных материалов. М.: НППА «Истек», 2009. 504 с. [Kornev A. E., Bukanova A. M., Sheverdyayev O. N. *Elastomeric material technology*. M., Istek, 2009, 504 p. (in Russian)]
- [8] Козлов П. В., Папков С. П. Физико-механические основы пластификации полимеров. М.: Химия, 1982. 224 с. [Kozlov P. V., Papkov S. P. *Physical and mechanical bases of polymer plasticization*. M., Khimiya, 1982, 224 p. (in Russian)]
- [9] Барштейн Р. С., Кирилович В. И., Носовский Ю. Е. Пластификаторы для полимеров. М.: Химия, 1982. 200 с. [Barshtein R. S., Kirilovich V. I., Nosovskii Y. E. *Plasticizers of polymers*. M., Khimiya, 1982, 200 p. (in Russian)]
- [10] Давыдова М. Л., Шадрин Н. В., Халдеева А. Р., Федорова А. Ф., Соколова М. Д. Влияние вулканизирующей системы на свойства и структуру резин на основе эпихлоргидринового каучука марки Hydrin T6000. Материаловедение, 2020, 9, 10–15. [Davydova M. L., Shadrinov N. V., Khaldeeva A. R., Fedorova A. F., Sokolova M. D. Influence of the vulcanizing system on the properties and structure of rubbers based on epichlorohydrin rubber brand Hydrin T6000. *Materialovedenie*, 2020, 9, 10–15 (in Russian)]
- [11] Шайдаков В. В. Свойства и испытания резин. М.: Химия, 2002. 235 с. [Shaidakov V. V. *Properties and testing of rubbers*. M., Khimiya, 2002, 235 p. (in Russian)]
- [12] Payne A. R., Whittaker R. E. Low strain dynamic properties of filled rubbers, *Rubber Chem Technol*, 1971, 44(2), 440–478.
- [13] Fedorova A. F., Davydova M. L., Shadrinov N. V., Sokolova M. D., Pavlova V. V., Fedorov A. L. Investigation of the effect of plasticizer injection technology on the properties of epichlorohydrin rubbers, *Journal of elastomers and plastics*, First Published 30 Oct 2020.
- [14] Robertson C. G., Roland C. M. Glass transition and interfacial segmental dynamics in polymer-particle composites, *Rubber Chem Technol*, 2008, 81(3), 506–522.

[15] Bohm G. A., Tomaszewski W., Cole W., Hogan T. Furthering the understanding of the non linear response of filler reinforced elastomers, *Polymer*, 2010, 51(9), 2057–2068.

DOI: 10.17516/1999-494X-0304

УДК 519.876.5

## **Production Planning Based on a Genetic Algorithm Controlled Simulation Model**

**Alexey N. Sochnev\***

*Siberian Federal University  
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 04.12.2020, received in revised form 11.02.2021, accepted 21.03.2021

**Abstract.** The article proposes an approach to solving the task of operational calendar planning of production based on the application of the principles of the optimization and simulation approach. The production simulation model is implemented using the Tecnomatix Plant Simulation software. The optimization procedure is represented by a genetic algorithm. In the implementation of the genetic algorithm, a simulation model is used to evaluate fitness functions. An example of using the proposed approach for a typical production system is given and the positive effect of its application is confirmed. Features of use, positive and negative properties, as well as the possibility of replication to other types of simulation models are revealed.

**Keywords:** resource-constrained project scheduling problem (RCPSp), operational calendar planning, optimization and simulation approach, simulation model, genetic algorithm.

Citation: Sochnev A.N. Production planning based on a genetic algorithm controlled simulation model, J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2021, 14(2), 233-243. DOI: 10.17516/1999-494X-0304

## **Планирование производства на основе управляемой генетическим алгоритмом имитационной модели**

**А. Н. Сочнев**

*Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, Красноярск*

**Аннотация.** В статье предложен подход к решению задачи оперативно-календарного планирования производства на основе применения принципов оптимизационно-имитационного подхода. Имитационная модель производства реализована средствами программы Tecnomatix Plant

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

\* Corresponding author E-mail address: asochnev@sfu-kras.ru

Simulation. Процедура оптимизации представлена генетическим алгоритмом. В реализации генетического алгоритма для оценки функции приспособленности используется имитационная модель. Приведен пример использования предложенного подхода для типичной производственной системы и подтвержден положительный эффект от его применения. Выявлены особенности использования, положительные и отрицательные свойства, а также возможности тиражирования на другие виды имитационных моделей.

**Ключевые слова:** задача планирования проекта с ограниченными ресурсами (RCPSP), оперативно-календарное планирование, оптимизационно-имитационный подход, имитационная модель, генетический алгоритм.

Цитирование: Сочнев, А. Н. Планирование производства на основе управляемой генетическим алгоритмом имитационной модели / А. Н. Сочнев // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2021, 14(2). С. 233-243. DOI: 10.17516/1999-494X-0304

## Введение

Одной из наиболее важных и сложных задач оптимизации является задача RCPSP (Resource-Constrained Project Scheduling Problem) – построение оптимального расписания выполнения работ проекта с учетом отношений предшествования между работами и с учетом необходимых и (или) доступных ресурсов, при котором будет оптимизирована некоторая целевая функция (например, минимизация длительности выполнения проекта). Задача RCPSP является экстремально NP-трудной [1, 2]. С точки зрения создания системы управления производственной системой описанная задача эквивалентна классической задаче оперативно-календарного планирования (ОКП) производства [3].

Для решения задачи RCPSP (ОКП) разработаны множество точных и приближенных методов, которые обладают разной скоростью и точностью решения [1, 4, 5]. Основная практическая проблема, с которой сталкиваются в рассматриваемой задаче, – это то, что необходимо осуществить поиск оптимального решения в большом пространстве поиска на множестве допустимых решений за приемлемое время. При этом выбор и анализ допустимых решений является сложной комбинаторной задачей. Методы решения задачи планирования можно условно разделить на три основных класса: аналитические, имитационные и аналитико-имитационные. Аналитические методы основываются на аппарате математического программирования, например динамического программирования, дискретной оптимизации и т. д. Эти методы принципиально позволяют получить оптимальный план, однако на практике решение задач, учитывающих множество реальных факторов, становится очень трудоемким. Другой недостаток аналитических методов – «жесткость» модели. Структурно изменить однажды построенную аналитическую модель может только математик достаточно высокой квалификации. В условиях частых структурных изменений, характерных для гибкого производства, эксплуатация такой модели затруднительна и малоэффективна. Одним из наиболее известных и эффективных методов решения задачи планирования процесса является алгоритм границ и ветвей [2, 6].

**Имитационные методы** планирования предусматривают проведение имитационного эксперимента на моделях, структурно подобных моделируемому объекту или процессу. Структурное подобие модели и объекта моделирования существенно упрощает внесение текущих изменений в модель.

Имитационные методы строятся по схеме последовательного анализа вариантов на основе правил предпочтения. Эта схема связана с пошаговым конструированием вариантов с помо-

щью моделирования, в процессе которого имитируется прохождение материальных потоков через производственный участок. При построении имитационной модели сравнительно просто учитываются такие трудноформализуемые в аналитических моделях ограничения, как структура транспортной сети, временный дефицит ресурсов, частичная и временная потеря работоспособности оборудования и ряд других.

Аналитико-имитационные методы строятся по схеме, включающей как аналитические, так и имитационные процедуры. Цель разработки таких схем – объединение достоинств обоих методов.

Известны два подхода к построению аналитико-имитационных процедур календарного планирования. Один подход предусматривает двухэтапное решение задачи. На первом этапе планируется обработка укрупненных партий изделий на двух или трех группах технологического оборудования. При этом из-за небольшой размерности целесообразно использовать точные или приближенные аналитические методы решения. На втором этапе строятся детальные календарные планы внутри каждой из выделенных групп оборудования с использованием имитационных методов.

Другой подход предполагает объединение аналитических и имитационных процедур в рамках одной модели. В данной статье предлагается для решения задачи использовать серию экспериментов с имитационной моделью, начальные параметры которой определяются с помощью генетического алгоритма [4, 7]. В основе данной идеи лежат основные положения оптимизационно-имитационного подхода к синтезу структур управления сложными системами, предполагающего совместное использование в процессе синтеза управления оптимизационных и имитационных моделей, их рациональное взаимодействие [8, 9].

### 1. Постановка задачи планирования

Общая постановка задачи RCPSP выглядит следующим образом [1]. Дано множество работ, возобновляемых и невозобновляемых ресурсов. Заданы длительности выполнения для каждой работы. Во время выполнения работы требуется заданное количество единиц ресурса  $k$ . После завершения работы освобожденные ресурсы в полном объеме могут быть мгновенно назначены на другие работы. Между некоторыми парами работ заданы ограничения предшествования. Требуется определить моменты времени начала выполнения работ так, чтобы минимизировать время выполнения всего проекта. При этом необходимо выполнение ограничений, связанных с использованием ресурсов и следования работ.

Формально задача планирования процесса ставится следующим образом [3]. Пусть на участке требуется обработать  $n$  деталей (или их партий). Обозначим  $L_{ij} = (q_{ij}, t_{ij})$  операцию с номером  $i$  ( $i = \overline{1, m_j}$ ), которая выполняется над  $j$ -й деталью ( $j = \overline{1, n}$ );  $m_j$  – число операций, которое необходимо выполнить над  $j$ -й деталью;  $q_{ij}$  – номер группы оборудования, настроенного на выполнение операции  $L_{ij}$ ;  $t_{ij}$  – номинальная продолжительность выполнения операций.

Решение задачи организуется на множестве допустимых планов

$$\Omega_p = \left\{ P: G = (L_{i_1}; L_{i_2}; \dots; L_{i_{m_j}}), t_{ij}^k = t_{ij}^0 + t_{ij}, t_{i_1 j_1}^0 \leq t_{i_2 j_2}^0, i = \overline{1, m_j}, j = \overline{1, n} \right\},$$

где  $G$  – технологический маршрут детали;  $t_{ij}^k$  – момент окончания операции  $L_{ij}$ ;  $t_{ij}^0$  – момент окончания операции  $L_{ij}$ ;  $t_{i_1 j_1}^0$  – момент начала операции  $i1$ ;  $t_{i_2 j_2}^0$  – момент начала операции  $i2$ .

Совокупность чисел  $P = \{0\}$ , удовлетворяющих ограничениям, называется календарным планом. Решение задачи календарного планирования заключается в отыскании неизвестных величин  $\{0\}$ . При формальной постановке задачи календарного планирования требуется задать целевую функцию планирования, которая каждому плану  $P$  ставит в соответствие некоторое число  $F(P)$ , оценивающее эффективность плана (критерий эффективности). Задача оптимального планирования заключается в отыскании такого плана  $P^*$ , который экстремизирует критерий эффективности  $F$  и удовлетворяет ограничениям.

**Критерии.** Выбор критерия эффективности осуществляется индивидуально для каждого конкретного производственного подразделения по результатам анализа его экономических, организационных и технических особенностей. Наиболее часто используют в качестве критерия эффективности минимизацию времени выпуска заданного объема продукции, минимизацию максимального времени простоя, максимизацию загрузки оборудования, минимизацию суммарных производственных затрат и др. Далее в качестве критерия оптимальности выбирается минимизация общего времени производственного процесса.

**Ограничения.** Кроме очевидных ограничений при решении задач календарного планирования необходимо учитывать еще ряд других. Наиболее часто учитывают следующие ограничения: структура сети транспортных маршрутов, директивные сроки окончания обработки определенных деталей, многочисленные ресурсные ограничения, в том числе динамические.

## 2. Основные положения предлагаемого подхода

Рассматривается задача RCPSPP (ОКП) в постановке, описанной выше. Исходя из представленной структуры процессов, существенной возможностью оптимизации можно признать перераспределение технологических маршрутов изделий в системе. Свободу выбора в данном случае предоставляет дублирующее друг друга технологическое оборудование (токарные станки). Также необходимо учитывать, что при определении вариантов распределения необходимо учитывать особенности технологических процессов. Например, в рассматриваемой производственной системе часть технологических процессов может выполняться только по фиксированному маршруту.

Примем для определенности, что маршруты деталей уже выбраны другим методом. В таком случае остается возможность перераспределения порядка следования изделий внутри сформированных маршрутов. Задача сводится к поиску оптимального следования изделий в группах. В общем случае маршрут может быть фиксирован только для одной партии изделий, но для упрощения решения он будет фиксирован для всех партий одного типа деталей.

Таким образом, процедура оптимизации предполагает реализацию множества повторяющихся итераций, по итогам реализации каждой из которых оценивается результат. Специфика эволюционной процедуры оптимизации в том, что требуется критерий ее остановки. В процедуре планирования производства он может быть определен экспертным методом, по условию остановки либо по количеству шагов поиска.

Основная особенность предлагаемой реализации генетического алгоритма состоит в использовании для оценивания приспособленности популяции эксперимента на имитационной модели (рис. 1). Это обстоятельство предъявляет особые требования к выбранному способу



Рис. 1. Оптимизация на основе генетического алгоритма

Fig. 1. Genetic Algorithm Optimization

имитационного моделирования: он должен давать оценку функции приспособленности максимально быстро. Поэтому в некоторых случаях имитационную модель, очевидно, придется упрощать и обобщать. В рассмотренном ниже примере это не потребовалось.

Представленная схема связана с пошаговым конструированием вариантов с помощью моделирования, в процессе которого имитируется прохождение материальных потоков через производственный участок.

Генетический алгоритм выбран по следующим основным причинам.

1. Большая размерность задачи. Пространство поиска очень велико, и задействовано большое количество параметров.
2. Сравнительно высокая скорость и эффективность по сравнению с традиционными методами.
3. Наличие потенциальной возможности реализации параллельных вычислений.
4. Генетический алгоритм предоставляет список «хороших» решений, а не просто одно решение. Для рассматриваемой задачи это является важным свойством.
5. Всегда получает решение задачи, которое со временем становится лучше.

### 3. Описание объекта исследования

Рассматривается предприятие, относящееся к среднесерийному производству, выпускающее подъемно-транспортное оборудование. Организационная структура предприятия представлена обрабатывающими и сборочными участками, а также вспомогательным хозяйством. Рассматривается участок листовой металлообработки в обрабатывающем производстве. В цехе листовой металлообработки используется оборудование, перечисленное в табл. 1.

При составлении маршрута изготовления детали производится сокращенное описание всех технологических операций в маршрутной карте в последовательности их вы-

Таблица 1. Технологическое оборудование участка

Table 1. Technological equipment of the site

№	Наименование оборудования
1	Гильотина ZDM
2	Гильотина VIMERCATI
3	Вертикально-гибочный гидравлический пресс VIMERCATI
4	Вертикально-гибочный гидравлический пресс ZDM
5	Координатно-пробивной пресс Euromac
6	Координатно-пробивной пресс YANGLI

Таблица 2. Технологические маршруты

Table 2. Technological routes

№ маршрута	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Набор станков в маршруте	1	2	1 3	1 4	2 3	2 4	1 5 3	1 5 4	2 5 3	2 5 4	2 6 3	2 6 4	1 5 3	1 5 4	2 5 3	2 5 4	2 6 3	2 6 4

полнения без указания переходов и технологических режимов, но с указанием типа оборудования. Маршрутное описание процессов обычно является основным в единичном и мелкосерийном производствах и сопроводительным (дополнительным) в других типах производств.

В исследуемом металлообрабатывающем цехе могут быть реализованы следующие технологические маршруты (табл. 2).

В качестве программной среды моделирования выбран Tecnomatix Plant Simulation. Выбор программы обусловлен интеграцией средств имитационного моделирования и генетического алгоритма в одной среде и большим количеством средств анализа процессов [10, 11]. Формально имитационная модель в программной среде Tecnomatix реализована на основе библиотеки стандартных модельных элементов программы (рис. 2).

**Параметризация имитационной модели.** Параметризация модели осуществлена созданием набора таблиц, содержащих данные о заказах, операциях и маршрутах.

Таблица «Заказ\_наряд» предназначена для постановки сменного задания. В таблице используются различные типы данных. В первом столбце «object» – графический объект (в данном случае деталь). Во втором столбце «integer» – целочисленное значение, представляющее количество деталей на запуск. В третьем столбце «string» – строковый тип данных, определяющий имя детали. В четвертом столбце «table» – таблица атрибутов.

Таблица «Справочник\_операций» – предназначена для переопределения атрибутов в данном случае на станках при прохождении графического объекта (детали) (табл. 3). Восьмой столбец идентифицирует маршрут детали в моделируемой системе. Структура маршрута в привязке к конкретному оборудованию определена в таблице «Маршруты».

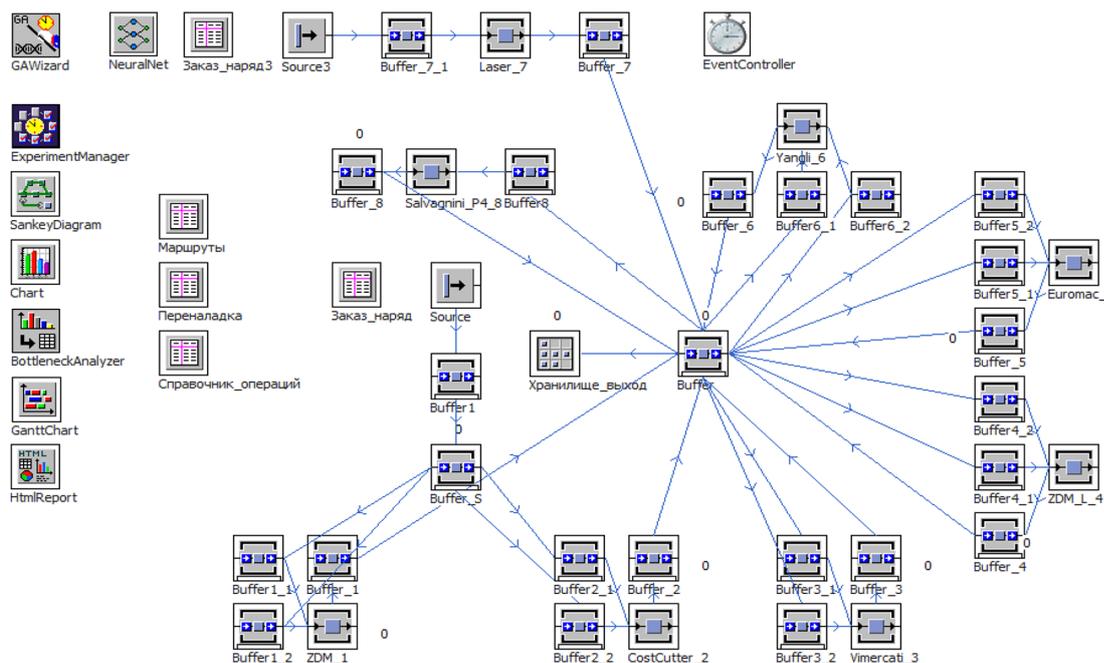


Рис. 2. Структура имитационной модели производственного процесса

Fig. 2. The structure of the simulation model of the production process

Таблица 3. Справочник операций

Table 3. Operations reference

string 1	time 2	time 3	time 4	time 5	time 6	time 7	integer 8	
string	Name	Time_operation_1	Time_operation_2	Time_operation_3	Time_operation_4	Time_operation_5	Time_operation_6	M
1	RRR	20.0000	32.0000	15.0000	35.0000	18.0000	24.0000	17
2	RRR1	40.0000	23.0000	16.0000	1:04.0000	15.0000	32.0000	14
3	RRR2	35.0000	36.0000	45.0000	17.0000	13.0000	20.0000	16
4	RRR3	23.0000	13.0000	34.0000	23.0000	23.0000	45.0000	15
5	RRR4	43.0000	23.0000	32.0000	33.0000	47.0000	42.0000	10

#### 4. Оптимальное планирование производства

Рассмотрим начальный вариант работы системы. Сформировано некоторое случайное распределение чередования партий деталей в маршрутах. На рис. 3 приведена имитационная модель производственной системы, в которой моделируется процесс обработки партий десяти наименований деталей на четырех станках (ZDM, VIMERCATI № 1, Euromac, VIMERCATI № 2). В результате моделирования цикл обработки всех деталей составил 5 ч 16 мин. Анализ результатов показывает, что оборудование загружено неравномерно и имеется большой объем незавершенного производства в системе.

Для оптимизации производственных процессов Tecnomatix Plant Simulation имеет в своем составе модуль оптимизации на основе генетического алгоритма. Применение генетического алгоритма предполагает предварительный выбор его параметров. Для решения задается

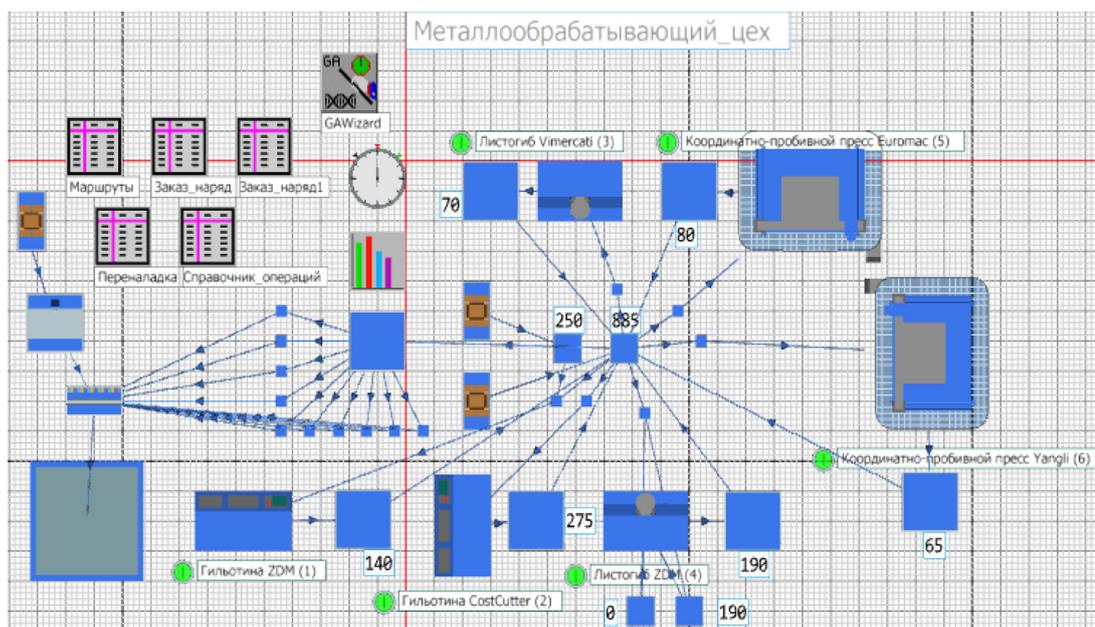


Рис. 3. Имитационный эксперимент с моделью

Fig. 3. Simulation experiment with a model

количество поколений, которое показывает количество решений задачи и размер поколения, который соответствует числу вариантов целевой функции в каждом решении. Исходя из требований к скорости и качеству решения, экспертным путем определили количество особей в популяции в каждом поколении (100 шт.).

Для ввода порядка следования деталей в модель создана еще одна таблица для параметризации. В качестве параметров оптимизации выбраны последовательности запуска заготовок каждого типа в производство (рис. 4). Модельным отображением выбранной целевой функции является общее время обработки всех деталей (переменная *simtime*).

Процесс поиска решения сопровождается изменением функций приспособленности. На рис. 5, 6 показаны значения функции приспособленности для первого и последнего поколений. Видно, что среднее значение целевой функции, представляющей общее время процесса в секундах, уменьшается. График на рис. 7, показывает, что минимальное значение практически устанавливается уже к 13-му поколению и незначительно улучшается к 20-му поколению.

В результате оптимизации получена новая последовательность запуска заготовок на обработку. Величина целевой функции после оптимизации для наилучшей хромосомы составила

string	Parameter:	root.Заказ_наряд	Parameter:	root.Заказ_наряд1
1	Последовательнос...	root.Заказ_наряд	Последовательнос...	root.Заказ_наряд 1
2	3 элементов		7 элементов	

Рис. 4. Настройка параметров оптимизации

Fig. 4. Setting optimization parameters

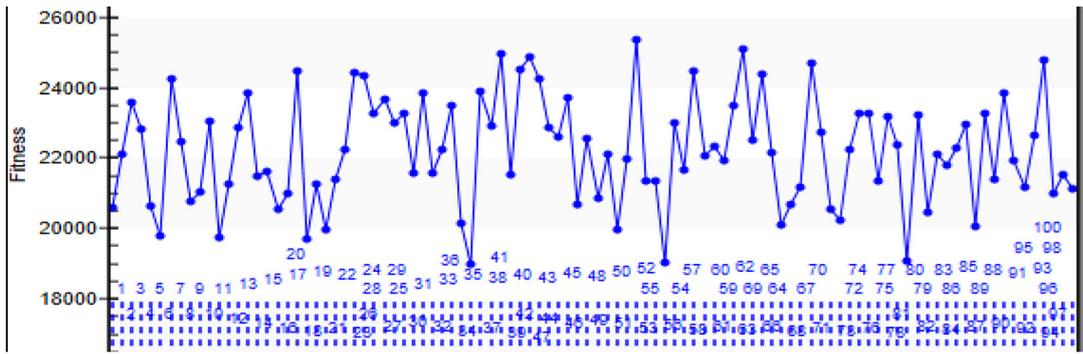


Рис. 5. Функции приспособленности 1-го поколения

Fig. 5. Fitness functions of the 1<sup>st</sup> generation

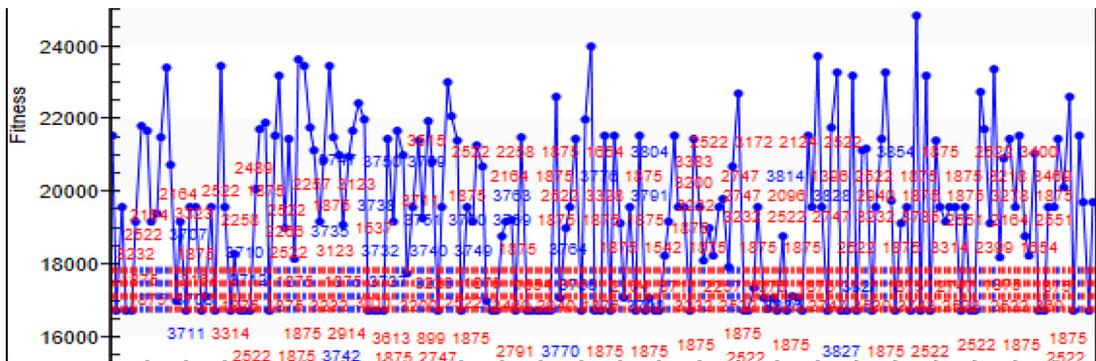


Рис. 6. Функции приспособленности 20-го поколения

Fig. 6. Fitness functions of the 20<sup>th</sup> generation

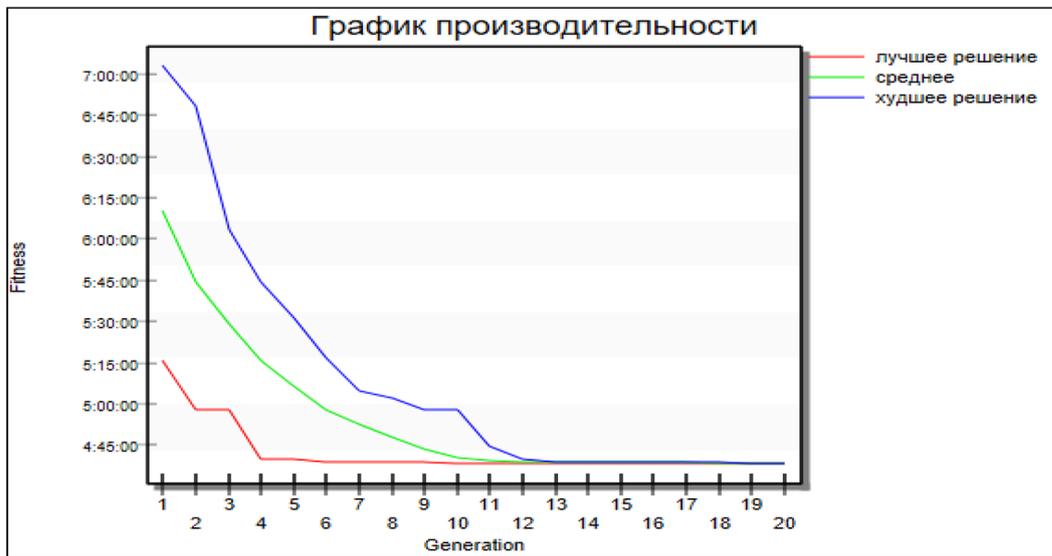


Рис. 7. Эволюционное изменение целевой функции по поколениям

Fig. 7. Evolutionary change in objective function by generation

4 ч 37 мин. Таким образом, время обработки всех партий заготовок на станках уменьшилось на 29 мин. Сокращение произошло за счет перераспределения загрузки оборудования и сокращения общего времени переналадок.

### Заключение

По итогам работы по тематике статьи получены следующие научные и научно-практические результаты. В рамках оптимизационно-имитационного подхода предложен подход решения задачи предварительного планирования производства на основе предварительной параметризации имитационной модели генетическим алгоритмом. Описанный подход апробирован при решении задачи управления типичной дискретной производственной системой на основе специализированного и актуального программного обеспечения.

Основные преимущества и недостатки данного подхода соответствуют особенностям генетического алгоритма. Явным преимуществом выступает возможность использования различных целевых функций разного уровня сложности, возможность работы с большим количеством параметров, возможность настройки алгоритма. Используемые программные средства скрывают от пользователя некоторые параметры процедуры оптимизации. В то же время остается возможность остановки алгоритма на любом шаге решения при достижении результатов, устраивающих исследователя с точки зрения допустимых сроков выпуска продукции и других параметров. Для практических задач это позволяет получить если не оптимальное, то близкое к нему решение.

Предложенный подход может быть применен и для других видов и форм представления имитационных моделей при наличии возможности управления имитацией, например, для достаточно популярного инструмента моделирования – формализмов сетей Петри.

### Список литературы / References

- [1] Аничкин А.С. Объектно-ориентированная среда для разработки приложений теории расписаний, дисс. канд. физ.-мат. наук. М., 2018, 168 с. [Anichkin A. S. *An object-oriented environment for developing scheduling theory applications*, Diss. of the cand. of phys. and math. Sci. Moscow, 2018, 168 p. (in Russian)]
- [2] Коваленко Ю.В. Сложность некоторых задач теории расписаний и эволюционные алгоритмы их решения, дисс. канд. физ.-мат. наук. Омск, 2013, 129 с. [Kovalenko Yu. V. *The complexity of some problems in scheduling theory and evolutionary algorithms for solving them*, Diss. of the cand. of phys. and math. Sci. Omsk, 2013, 129 p. (in Russian)]
- [3] Сочнев А.Н. Сетевые модели в системах управления производством. Красноярск: Сиб. федерал. ун-т, 2014. 162 с. [Sochnev A. N. *Network models in production management systems*. Krasnoyarsk, Sib. Fed. Univ., 2014, 162 p. (in Russian)]
- [4] Васильев А.С., Матвейкин В.Г. Модификация генетического алгоритма для решения задачи календарного планирования с ограниченными ресурсами, Вестник Тамбовского государственного технического университета, 2008, 14(2), 310–314 [Vasiliev A. S., Matveykin V. G. Modification of the genetic algorithm to solve scheduling problems with limited resources, *J. of the Tambov St. Tech. Univ.*, 2008, 14(2), 310–314 (in Russian)]
- [5] Катаев А.В., Катаева Т.М., Макарова Е.Л. Управление проектами: математические модели оптимального назначения исполнителей проектных работ, Известия Саратовского

университета, 2016, 3, 294–299 [Kataev A. V., Kataeva T. M., Makarova E. L. Project management: mathematical models of the optimal assignment of design work performers, *Izv. Saratov Univ.*, 2016, 3, 294–299 (in Russian)]

[6] Костюк Ю.Л. Эффективная реализация алгоритма решения задачи коммивояжера методом ветвей и границ, *Прикладная дискретная математика*, 2013, 2 (20), 78–90 [Kostyuk Yu. L. Effective implementation of the algorithm for solving the traveling salesman problem using the branch and bound method, *Appl. Discr. Math.*, 2013, 2(20), 78–90 (in Russian)]

[7] Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 320 с. [Gladkov L. A., Kureichik V. V., Kureichik V. M. *Genetic Algorithms*, Moscow, FIZMATLIT, 2006, 320 p. (in Russian)]

[8] Цвиркун А.Д., Акинфиев В.К., Филиппов В.А. Имитационное моделирование в задачах синтеза структуры сложных систем (оптимизационно-имитационный подход). М.: Наука, 1985. 175 с. [Zvirkun A. D., Akinfiev V. K., Filippov V. A. *Simulation in problems of synthesis of the structure of complex systems (optimization-simulation approach)*, Moscow, Nauka, 1985, 175 p. (in Russian)]

[9] Ковалев И.В., Царев Р.Ю., Тюпкин М.В., Цветков Ю.Д. Оптимизационно-имитационный подход к синтезу автоматизированных систем управления, *Программные продукты и системы*, 2007, 3, 73–74. [Kovalev I. V., Tsarev R. Yu., Tyupkin M. V., Tsvetkov Yu. D. Optimization and simulation approach to the synthesis of automated control systems, *Soft. Prod. and Syst.*, 2007, 3, 73–74 (in Russian)]

[10] Чижов М.И., Скрипченко Ю.С., Гусев П.Ю. Автоматизация и оптимизация технологических процессов в Tecnomatix Plant Simulation, *Вестник Воронежского государственного технического университета*, 2011, 7(12–1), 36–38. [Chizhov M. I., Skripchenko Yu. S., Gusev P. Yu. Automation and optimization of technological processes at Tecnomatix Plant Simulation, *J. of Voronezh St. Tech. Univ.*, 2011, 7(12–1), 36–38 (in Russian)]

[11] Чижов М.И., Скрипченко Ю.С., Гусев П.Ю. Моделирование технологических процессов в Tecnomatix Plant Simulation, *Вестник Воронежского государственного технического университета*, 2011, 7, 18–20 [Chizhov M. I., Skripchenko Yu. S., Gusev P. Yu. Process Modeling at Tecnomatix Plant Simulation, *J. of Voronezh St. Tech. Univ.*, 2011, 7, 18–20 (in Russian)]

DOI: 10.17516/1999-494X-0305

УДК 691.33

## **New Methodology for Designing External Fencing Structures Energy Efficient Civil Buildings**

**Said S. Shaumarov\***

*Tashkent Institute of Railway Engineers  
Tashkent, Uzbekistan*

Received 22.10.2020, received in revised form 14.12.2020, accepted 21.03.2021

**Abstract.** Based on the performed theoretical studies and calculations, the developed methodological foundations of designing the external enclosing structures of energy-efficient buildings based on cellular concrete with a given set of properties are presented, which are of great economic importance for construction oriented in the modern period towards the creation of energy-efficient civil facilities.

**Keywords:** methodology, energy efficiency, exterior walls, design, cellular concrete, research, pore structure.

Citation: Shaumarov S.S. New methodology for designing external fencing structures energy efficient civil buildings, J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2021, 14(2), 244-251. DOI: 10.17516/1999-494X-0305

## **О новой методологии проектирования наружных ограждающих конструкций энергоэффективных гражданских зданий**

**С. С. Шаумаров**

*Ташкентский институт инженеров  
железнодорожного транспорта  
Узбекистан, Ташкент*

**Аннотация.** На основании выполненных теоретических исследований и расчетов представлены разработанные методологические основы проектирования наружных ограждающих конструкций энергоэффективных зданий на основе ячеистого бетона с заданным комплексом свойств, имеющие важное народнохозяйственное значение для строительства, ориентированного в современный период на создание энергоэффективных объектов гражданского назначения.

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

\* Corresponding author E-mail address: shomarovss@gmail.com

**Ключевые слова:** методология, энергоэффективность, наружные стены, проектирование, ячеистый бетон, исследования, поровая структура.

---

Цитирование: Шаумаров, С. С. О новой методологии проектирования наружных ограждающих конструкций энергоэффективных гражданских зданий / С. С. Шаумаров // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2021, 14(2). С. 244–251. DOI: 10.17516/1999–494X-0305

---

### Introduction

Scientists all over the world are involved in the design of energy-efficient civil buildings and their structures: M. Mikheev [1], B.F. Vasiliev [2], Yu. A. Matrosov [3], V.M. Ilyinsky [4], Yu. A. Tabunshchikov [5, 6], V.N. Bogoslovsky [7], V.L. Kurbatov [8], A.S. Semchenkov [9], V.G. Gagarin [10], W. Feist [11] and others [12–14]. An analysis of the results of their research showed that the currently used methods of designing external building envelopes for buildings of this type do not have sufficient scientific justification, and the structural solutions of the walls themselves are rather complicated in technical design, do not take into account the specific climatic, economic and raw materials of the construction areas. In this regard, the development of a methodology for designing the exterior walls of energy-efficient civil buildings seemed quite relevant, which, in turn, required a series of special scientific studies.

### Methodology development

From an analysis of literary sources and experience in the construction of civil buildings on the territory of the Republic of Uzbekistan, it was found that one of the most effective in their properties and manufacturing techniques for the construction of the exterior walls of buildings is a single-layer fencing made of cellular concrete. However, it is obvious that in order to solve the problem of creating wall fencing for energy-efficient buildings, a comprehensive approach is needed, which includes the formation of requirements for external walls that differ in static function and heat-shielding properties, determining the optimal structure of the material and developing appropriate technological methods that allow the construction to achieve the required qualities, design parts and assemblies that exclude heat transfer [15–16].

Having set out to obtain wall structures made of cellular concrete with the required strength and heat insulation properties in the least expensive way, it was decided to initially optimize the thickness of the outer wall of civil buildings based on existing experience in construction in the Republic of Uzbekistan. This saves money for manufacturers of building envelopes, as it significantly reduces the required number of sizes of formwork elements for the manufacture of panels or blocks.

An analysis of the structural solutions of the external walls in Uzbekistan made it possible to establish that the most appropriate size for the thickness of cellular concrete products may be 400 mm.

The required values of the coefficients of thermal conductivity of aerated concrete for external walls were established taking into account the climatic characteristics of the construction area, number of storeys and a given level of thermal protection of buildings, and the necessary strength properties were established based on the static functions of the designed walls (load-bearing or self-supporting). Calculations showed that the outer walls 400 mm thick of cellular concrete D700–D900, which can be used as material for load-bearing walls in seismic construction conditions, do not have the required heat-shielding properties (the thermal conductivity was found to be (52–69)% higher than required),

which indicates the need for a directed effect on the structure of this material in order to reduce its heat conductivity coefficient, or a directed effect on the structure of cellular concrete D400 and D500 in order to increase their strength.

Providing both the required heat-shielding and strength properties of cellular concrete is a rather difficult task, since these properties represent an alternative with respect to average density, that is, a decrease in average density increases the thermotechnical and hygroscopic properties of cellular concrete, but reduces the strength properties and vice versa. To solve this problem, we used an approach based on mathematical modeling of the macrostructure of cellular concrete that meets the required thermal conductivity [17–18].

### **Mathematical modeling of the structure of cellular concrete with given values of thermal conductivity**

The correctness of the task, in addition to experimental studies, follows from the thermodynamic analysis of heat and moisture transfer in porous materials. For a theoretical description of the process of heat and moisture transfer in porous media, one can use the system of differential equations obtained by A. V. Lykov:

$$C_{\Sigma} \frac{\partial T}{\partial t} - \varepsilon r \frac{\partial W_l}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + (C_l D_l \nabla W_l + C_l D_{Tl} \nabla T) \nabla T, \quad (1)$$

$$(1 - \varepsilon) \frac{\partial W_l}{\partial t} = \nabla(D_l \nabla W_l) + (D_{Tl} \nabla T). \quad (2)$$

In (1), (2):  $C_{\Sigma} = C_s + W_l C_l$ ;  $T, \lambda$  – respectively the temperature and thermal conductivity of a wet body;  $C_s$  – is the specific heat of a unit volume of the dry porous material  $W_l, C_l, r, D_l, D_{Tl}$  – is the concentration, specific heat, specific heat of evaporation, heat transfer coefficient of liquid moisture, coefficient of thermal diffusion of the liquid, respectively;  $\varepsilon$  – phase transformation criterion, which is defined as the ratio of the change in moisture content through evaporation and condensation to the

change in moisture content due to liquid transfer;  $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}$  – operator Nabla.

The system of differential equations of heat and moisture transfer in porous materials presented in form (1), (2) is undoubtedly simpler than its classical representation [19–21], but this simplicity, firstly, creates certain difficulties in their practical application, since the criterion phase transition is a «fictitious» physical parameter for which there is no fundamental possibility of measuring it. Secondly, from the point of view of the problem posed by us, it is extremely important that in equations (1), (2) in the explicit form there is no predominance for porous materials, in particular, for cellular concrete, the porosity parameter. Therefore, we transform equations (1), (2) to the form, eliminating the parameter  $\varepsilon$ , from them, introducing the porosity parameter  $P$ :

$$C_{\Sigma} \frac{\partial T}{\partial t} - r \frac{\partial W_l}{\partial t} = \lambda \nabla T + (k \nabla W_l + m \nabla T) \nabla T - r \nabla(D_l \nabla W_l + D_{Tl} \nabla T), \quad (3)$$

$$R \frac{\partial T}{\partial t} + Q \frac{\partial W_l}{\partial t} = \nabla[(D_{Tl} + D_l) \nabla T] + \nabla[(D_v + D_l) \nabla W_l], \quad (4)$$

$$C_{\Sigma} = C_s + W_1 C_1 + W_v C_v; m = \frac{\partial \lambda}{\partial T} + C_v D_{T_v} + C_l D_{T_l}; k = \frac{\partial \lambda}{\partial W_l} + C_l D_l + C_v D_v;$$

$$W_v = \rho_v \left( P - \frac{W_l}{\rho_l} \right); \rho_v = \rho_v(T, W_l);$$

$$R = \frac{\partial \rho_v}{\partial T} \left( P - \frac{W_l}{\rho_l} \right); Q = 1 - \frac{\rho_v}{\rho_l} + \frac{\partial \rho_v}{\partial W_l} \left( P - \frac{W_l}{\rho_l} \right).$$

This system of differential equations (3) and (4) describes the heat transfer process for a given coefficient of thermal conductivity, depending on the macrostructure of aerated concrete, characterized by the porosity parameter  $P$ .

In accordance with the conceptual approach to the problem of mathematical modeling of the macrostructure of porous materials, the software package «Modeling the macrostructure of cellular concrete with predetermined thermotechnical properties» was developed [22–23].

Based on the developed physical and mathematical model, which has been algorithmized and implemented in the form of the specified software product, by numerical calculations, it was possible to determine the optimal parameters of the pore structure of cellular concrete (pore size at their adopted three-modal laying, the thickness of the inter-pore walls), which allow achieving both the required strength and thermal conductivity coefficient (Table 1).

Table 1. The results of modeling the macrostructure of aerated concrete corresponding to a given coefficient of thermal conductivity for a «random» type of packaging with a uniform probability density of a three-modal distribution and a matrix density of 2000 kg/m<sup>3</sup>

Coefficient thermal conductivity, W/m °C	The size Since, mm	Thickness Partitions, mm	Average density, kg/m <sup>3</sup>	Strength, MPa	Porosity, %
1	2	3	4	5	6
0,085	r <sub>1</sub> =2,426 r <sub>2</sub> =1,618 r <sub>3</sub> =3,466	2,208	300	1	85
0,095	r <sub>1</sub> =2,473 r <sub>2</sub> =1,649 r <sub>3</sub> =3,534	2,251	400	2	81
0,123	r <sub>1</sub> =2,403 r <sub>2</sub> =1,602 r <sub>3</sub> =3,434	2,187	500	3	74
0,143	r <sub>1</sub> =2,220 r <sub>2</sub> =1,480 r <sub>3</sub> =3,171	2,020	600	4	71
0,174	r <sub>1</sub> =1,808 r <sub>2</sub> =1,205 r <sub>3</sub> =2,582	2,020	700	5	66
0,199	r <sub>1</sub> =1,429 r <sub>2</sub> =0,952 r <sub>3</sub> =2,041	1,300	800	6	60

Continuation of Table 1

1	2	3	4	5	6
0,233	$r_1=0,931$ $r_2=0,621$ $r_3=1,330$	0,847	900	8	55
0,262	$r_1=0,575$ $r_2=0,384$ $r_3=0,822$	0,524	1000	10	52
0,314	$r_1=0,161$ $r_2=0,107$ $r_3=0,230$	0,147	1100	12	45
0,334	$r_1=0,073$ $r_2=0,049$ $r_3=0,105$	0,067	1200	16	40

The above simulation results determine the direction of development of appropriate technological methods based on existing standard techniques to achieve the required structure parameters of aerated concrete, providing the desired heat engineering and/or strength properties.

Another important point is the ability to diagnose structural parameters and physical properties of cellular concrete. For these purposes, using the theory of fractal dimension, a «Program for determining the properties of cellular concrete based on image analysis» was developed.

Based on the results of the research, a methodology for the design of external walling was developed, which is presented in the form of a diagram in Fig.

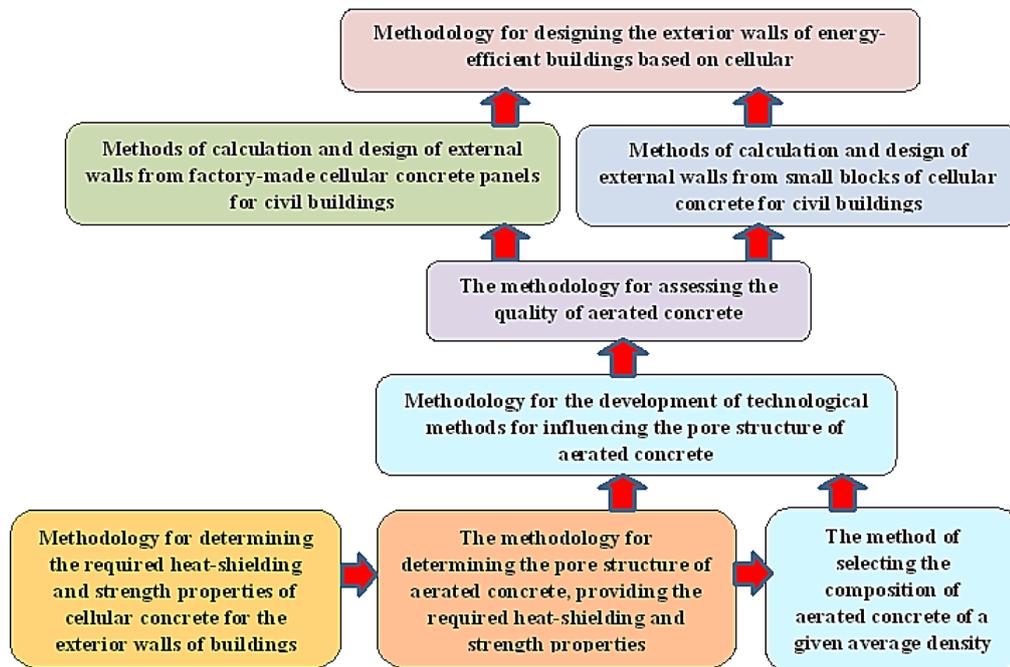


Fig. Design methodology for exterior walls of energy-efficient buildings based on aerated concrete

### Conclusion

The developed methodological foundations for designing exterior walls for energy-efficient civil buildings, including a number of standard and newly proposed methods based on the results of theoretical and experimental studies, allow us to design exterior walling with improved heat-shielding properties and at the same time technological, economically feasible and environmentally friendly, in addition, indicate a further prospect of research in this direction.

### References / Список литературы

- [1] Михеев М. А., Михеев И. М. *Основы теплопередачи*, 2-е изд. М.: Энергия, 1977. 343 с. [Mikheev M. A., Mikheev I. M. *Basics of heat transfer*, 2-ed. M., Energy, 1977. 343 p. (in Russian)]
- [2] Васильев Б. Ф. *Натурные исследования температурно-влажностного режима крупнопанельных жилых зданий*. М.: Стройиздат, 1968. 120 с. [Vasiliev B. F. *Field studies of the temperature and humidity conditions of large-panel residential buildings*. M., Stroyizdat, 1968. 120 p. (in Russian)]
- [3] Матросов Ю. А., Ярмаковский В. Н. Энергетическая эффективность зданий при комплексном использовании модифицированных легких бетонов. *Строительные материалы*. 2006, 1, 19–21 [Matrosov Yu. A., Yarmakovskiy V. N. Energy efficiency of buildings with the integrated use of modified lightweight concrete. *Building Materials*, 2006, 1, 19–21 (in Russian)]
- [4] Ильинский В. М. *Строительная теплофизика (ограждающие конструкции и микроклимат зданий)*. М.: Высшая школа, 1974. 320 с. [Ilyinsky V. M. *Construction Thermophysics (building envelopes and microclimate of buildings)*. M., Higher School, 1974. 320 p. (in Russian)]
- [5] Табунщиков Ю. А., Бродач М. М. *Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий*. М.: АВОК–ПРЕСС, 2002. 194 с. [Tabunshchikov Yu. A., Brodach M. M. *Mathematical modeling and optimization of thermal efficiency of buildings*. M., АВОК–PRESS, 2002. 194 p. (in Russian)]
- [6] Табунщиков Ю. А., Хромец Д. Ю., Матросов Ю. А. *Тепловая защита ограждающих конструкций зданий и сооружений*. М.: Стройиздат, 1986. 380 с. [Tabunshchikov Yu. A., Khromets D. Yu., Matrosov Yu. A. *Thermal protection of building envelopes of buildings and structures*. M., Stroyizdat, 1986. 380 p. (in Russian)]
- [7] Богословский В. Н. *Строительная теплофизика (теплотехнические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха)*. М.: Высшая школа, 1982. 415 с. [Bogoslovsky V. N. *Construction Thermophysics (Thermotechnical Basics of Heating, Ventilation and Air Conditioning)*. M., Higher School, 1982. 415 p. (in Russian)]
- [8] Курбатов В. Л. Энерго-ресурсосберегающие многослойные конструкции стеновых блоков. *Известия ВУЗов. Строительство*. 2000, 9, 4–9 [Kurbatov V. L. Energy-resource-saving multi-layer construction of wall blocks. *News of universities. Building*, 2000, 9, 4–9 (in Russian)]
- [9] Семченков А. С., Семечкин А. Е., Литвиненко Д. В. *Комплексный подход к проектированию наружных стен. Бетон и железобетон: пути развития*. Науч. практ. конфер. М.: НИИЖБ, 2005, 2, 211–222 [Semchenkov A. S., Semechkin A. E., Litvinenko D. V. An integrated approach to the design of external walls. *Concrete and reinforced concrete: development paths*. Scientific practical conference. M., NIIZHB, 2005, 2, 211–222 (in Russian)]

[10] Гагарин В.Г., Козлов В.В. Теоретические предпосылки расчета приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций. *Строительные материалы*, 2010, 12, 4–12 [Gagarin V. G., Kozlov V. V. Theoretical background for calculating the reduced resistance to heat transfer of building envelopes. *Building Materials*, 2010, 12, 4–12 (in Russian)]

[11] Feist W. *Thermal Insulation of Passive Houses*. Passive House Institute. 2006. 36 p.

[12] Shaumarov S. S., Adilhodzhaev A. I., Shipacheva E. V., Kandkhorov S. I. Development of New Constructive and Heat-Insulating Materials. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 2019, 7, 5S3, 577–580.

[13] Adilhodzhaev A. I., Shaumarov S. S., Shipacheva E. V., Kandahorov S. I. Modeling of machine structure Composite construction materials. *European Journal of Research*. Austria, Viena, 2019 y, 2, 75–84.

[14] Adilhodzhaev A. I., Shaumarov S. S., Shipacheva E. V., Shermuhamedov U. Z. New Method for Diagnostic of Heat Engineering and Mechanical Properties of Cellular Concrete. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 2019, 9(1), 6885–6887.

[15] Adilhodzhaev A. I., Shaumarov S. S. The issue of thermal renovation of infrastructure of railway transport is evaluated. *X International Scientific Conference «Transport Problems – 2018»*. Wisla, Katowice, Poland. P. 13–18.

[16] Shaumarov S. S. On the issue of increasing energetic efficiency of buildings in railway transport. *VIII International Scientific Conference «Transport Problems – 2016»*, Katowice, Poland. 522–532 p.

[17] Shaumarov S. S., Adilhodzhayev A. I., Kondrazhenko V. I. Experimental research of structural organization of heat-insulating structural building materials for energy efficient buildings. *XXII International Scientific Conference on Advanced In Civil Engineering «Construction the formation of living environment»* 2019, p. 1–7.

[18] Адилходжаев А. И., Махаматалиев И. М., Шаумаров С. С. Теоретические аспекты структурно-имитационного моделирования макроструктуры композиционных строительных материалов. *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*, 2018, (3) 312–320. [Adilkhodjaev A. I., Makhamataliev I. M., Shaumarov S. S. Theoretical aspects of the structural-imitation modeling of the macrostructure of composite building materials. *Scientific and Technical Bulletin of the Bryansk State University*, 2018, 3, 312–320 (in Russian)]

[19] Адилходжаев А. И., Шаумаров С. С. К исследованию вопроса повышения энергоэффективности зданий на железнодорожном транспорте. *Современные проблемы транспортного комплекса России*. 2018, 1, 4–11 [Adilkhodjaev A. I., Shaumarov S. S. The issue of improving the energy efficiency of buildings in railway transport. *Modern problems of the transport complex of Russia*. 2018, 1, 4–11 (in Russian)]

[20] Шаумаров С. С. Моделирование процесса формирования температурного поля наружного ограждения зданий на железнодорожном транспорте. *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. 2018, 3, 338–346. [Shaumarov S. S. Modeling the process of forming the temperature field of the external fencing of buildings on the railway transport. *Scientific and Technical Bulletin of the Bryansk State University*, 2018, 3, 338–346 (in Russian)]

[21] Шаумаров С. С., Щипачева Ю. А. Комплексный подход к проблеме термообновления стен панельных зданий. «TRANS-MECH-ART-CHEM»: *Материалы VII Международной научно-*

*практической конференции*. Москва, МИИТ, 2010, 239–241 [Shaumarov S. S., Shipacheva Y. A. An integrated approach to the problem of thermal renewal of the walls of panel buildings. «TRANS-MECH-ART-CHEM»: *materials of the VII International. scientific practical conference*. Moscow, МИИТ, 2010, 239–241 (in Russian)]

[22] Adilhodzhayev A. I., Shaumarov S. S., Umarov K. S. New Structure Assessment Method Cell Concrete. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 2020, 29(5), 1889–1893.

[23] Щипачева Е. В., Шаумаров С. С. О методе оценки теплозащитных свойств наружных стен эксплуатируемых жилых зданий. Вестник ТашИИТ. Ташкент, 2017, 1/2, 1–6 [Shipacheva E. V., Shaumarov S. S. On the method of assessing the heat-shielding properties of the outer walls of operated residential buildings. *Bulletin TashIIT*. Tashkent, 2017, 1/2, 1–6 (in Russian)]

DOI: 10.17516/1999-494X-0306

УДК 551:519.83

## **Game Graph and Formats Approach for Mixlingual Data Ontology for Geological and Marketing Tasks**

**Ekaterina S. Skornyakova<sup>\*a</sup>,  
Dmitry V. Lichargin<sup>a,b</sup> and Pavel V. Polunian<sup>a,b</sup>**

*<sup>a</sup>Siberian Federal University  
Krasnoyarsk, Russian Federation  
<sup>b</sup>Information Estimation Institute  
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 02.12.2020, received in revised form 16.02.2021, accepted 21.03.2021

**Abstract.** The paper introduces a new concept – trans-forest. A forest is a complex of additional connected trees. The skeleton of the graph is the basic multi-hierarchy. Subjects and “forces” are sources of moves on the playing field of the trans-forest based on the rules of the generative grammars of Montague. Each move of all generative grammars is synchronized with the meta-generative grammar – the “daemon of time”. Each turn over a trans-forest can be done by moving the present marker on the time tree to the “Next” position. Particular attention is paid to the format tree and trans-connections between trees and its levels, since it is the format tree that determines human behavior in certain situations. An algorithm of evolutionarily justified expansions is proposed, the purpose of which is to ensure well-being for the subject himself and other subjects. The proposed trans-forest model is intended for modeling educational, language IT marketing, geological and other situations from the point of view of graph theory and game theory.

**Keywords:** game theory, graph theory, trans-tree, trans-forest, generative grammar.

Citation: Skornyakova E.S., Lichargin D.V., Polunian P.V. Game graph and formats approach for mixlingual data ontology for geological and marketing tasks, J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2021, 14(2), 252-259. DOI: 10.17516/1999-494X-0306

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

\* Corresponding author E-mail address: ivasam248@gmail.com

## **Игровой граф и форматный подход для смешанно-языковой онтологии данных в задачах геологии и маркетинга**

**Е. С. Скорнякова<sup>а</sup>,**

**Д. В. Личаргин<sup>а,б</sup>, П. В. Полуян<sup>а,б</sup>**

*<sup>а</sup>Сибирский федеральный университет*

*Российская Федерация, Красноярск*

*<sup>б</sup>Институт оценки информации*

*Российская Федерация, Красноярск*

---

**Аннотация.** В работе вводится новое понятие – «транслес» (trans-forest). Лес является совокупностью деревьев, связанных дополнительно. Остов графа составляет базовая мультииерархия. Субъекты и «силы» являются на игровом поле транслеса источниками ходов на основе правил порождающих грамматик Монтегю. Каждый ход всех порождающих грамматик синхронизирован с метاپорождающей грамматикой – «демоном времени». Каждый ход над транслесом можно сделать с передвижкой маркера настоящего на дереве времени на позицию «Следующий». Особенно внимание уделяется дереву форматов и транссвязям между деревьями и его уровнями, поскольку именно дерево форматов определяет поведение человека в тех или иных ситуациях. Предлагается алгоритм эволюционно оправданных экспансий, цель которого обеспечение благополучия для самого субъекта и других субъектов. Предложенная модель транслеса предназначена для моделирования учебных, языковых IT-маркетинговых, геологических и иных ситуаций с точки зрения теории графов и теории игр.

**Ключевые слова:** теория игр, теория графов, трансдеревья, транслес, порождающая грамматика.

---

Цитирование: Скорнякова, Е. С. Игровой граф и форматный подход для смешанно-языковой онтологии данных в задачах геологии и маркетинга / Е. С. Скорнякова, Д. В. Личаргин, П. В. Полуян // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2021, 14(2). С. 252-259. DOI: 10.17516/1999-494X-0306

---

### **Введение**

Вопрос о единой философско-математической модели мира ставился давно. И системный анализ является далеко не единственным подходом на пересечении философии и математики, в частности дискретной математики.

Первыми работами, которые были связаны с философией математики, стали труды древних философов, особенно греческих. Они интересовались началом мира и природой чисел, вводимых человеком, они первыми осознали относительность простого и сложного.

Одним из первых вопросов о моделировании игровых миров поставил, безусловно, Лейбниц. Однако научные исследования стали возможными лишь во второй половине XX века, когда возникла необходимость управлять быстро возрастающей сложностью создаваемых артефактов, в особенности программным обеспечением. Современная теория возникла из кибернетики Н. Винера, общей теории систем Л. Берталанфи и теории динамических систем, восходящей к И. Ньютону и А. Пуанкаре. С начала 1950-х годов в разработке этой теории деятельное участие принимают специалисты корпорации RAND, созданной для перспективных исследований в сфере компьютеринга.

Изучение этой проблемы в России осуществляется чаще всего под эгидой синергетики, в рамках которой работают известные отечественные философы и исследователи: В.И. Аршинов, В.Г. Буданов, И.С. Добронравова, К.Х. Делокаров, Д.И. Трубецков, В.В. Василькова, Д.С. Чернавский, В.В. Тарасенко, Р.Г. Баранцев, В.А. Шупер, В.П. Визгин, В.Г. Пушкин, В.С. Егоров, Н.С. Автономова, А.И. Алешин, И.А. Акчурин, М.К. Петров, И.С. Алексеев, А.А. Ахундов, А.А. Воронин, В.В. Налимов, Ф.И. Гиренок, В.А. Лекторский, Л.А. Микешина, А.А. Андронов, Л. Левкович-Маслюк, П.П. Гайденок, В.С. Степин, С.С. Хоружий, Б.Г. Юлина, М.А. Розов, В.П. Филатов, В.Н. Порус, В.И. Моисеев, В.С. Швырев, В.И. Арнольд, А.В. Гапонов-Грехов, Г.К. Вороновский, Н.М. Амосов, Т.С. Ахромеева, Б.Б. Кадомцев, С.П. Капица, Ю.А. Данилов, К.В. Махотило, А.П. Ершов, О.Е. Баксанский, Ю.Л. Климонтович, С.Н. Петрашев, Г.Г. Малинецкий, А.П. Руденко, В.М. Глушков, Г.Е. Цейтлин, С.А. Сергеев, Е.Л. Ющенко, А.Н. Горбань, А.С. Дмитриев, Г.М. Идлис, Г.Р. Громов, Л.О. Мандельштам, В.Г. Редько, С.Э. Хайкин, С.П. Курдюмов, С.Е. Дромашко, Ю.И. Манин, А.Н. Шарковский, Г.Ю. Ризниченко, Р.Г. Хлебопрос, Ю.Л. Романовский, С.В. Мейен, Н.Н. Моисеев, А.Б. Потапов, А.М. Хазен, Г.А. Меерович.

В этой сфере науки работают многие зарубежные исследователи: С. Бир, Г. Хакен, Д. Роуз, К. Майнцер, Э. Ласло, П. Прузинкевич, В.Г. Тим, С. Кауфман, И. Пригожин, Г. Бюржель, Ф. Вучетич, В. Басиос, И. Антонеу, Г. Патти, С. Вольфрам, Г. Шефер, П. Бенгли, М. Биркхард, Р. Брукс, Ф. Варела, Р. Вайтеккер, Н. Гесслер, Г. Николис, К. Гилман, Д. Энтони, К. Мур, Д. Микулески, Д. Чамберс, И. Стюарт, К. Нихейнив, К. Лэнгтон, К. Энди, М. Червински, Т. Нагель, Х.-О. Пайтаген, Р. Роузен, Ю. Кэнада, К. Лукас, П. Конвей, К. Стивене, У. Провост, Т. Янг, Дж. фон Нейман, Г. Демерси, Э. Приме, Я. Бар-Ям, П. Тагерд, В. Турчин, Д. Фолк, Р. Эшби, Ф. Хейлиген, А. Линденмайер, К. Эмич, Б. Смит, П. Вацлавик, М. Боден, П. Кнапп, С. Пайперт, В. Димитров, С. Сандерс, Э. Брюс, М. Чандлер, Д. Р. Чи, М. Хаим, Х. Прайс, Д. Вольперт, С. Улам, Л.М. Рош, Г. Саймон, Г. Чейтин, К. Шелли, Р.Х. Абрахам, У. Матурана, Д. Уотсон, Д. Касти, А. Онар, Г. Одум, Ф.Д. Абрахам, Д. Кэмпбелл.

### Игровое поле

С точки зрения философии графовое поле игры разделено на логические секторы:

1) дерево (иерархия) форматов, дающее возможность выбора из подхода к деятельностно-познавательной игре субъектов:

- а) личностный (темперамент (холерик, сангвиник, меланхолик, флегматик), привычки, временной формат (ночью – сон, утром – зарядка);
  - б) ситуативный (правила этикета);
  - в) социальные роли;
- 2) дерево (иерархия) понятий на основании тех или иных критериев;
  - 3) иерархия времени, синхронизированная по ходам с ходом игры;
  - 4) дерево (иерархия) игрового поля (например, «мир-страна-регион»);
  - 5) отдельно вводится уровень иррационального субъекта, аппроксимируемого в модели, как граф модели всего мира, усвоенного некой умозрительной, предполагаемой нейросетью субъекта;

б) просубъектный уровень некой материальной подложки субъектов, алгоритмические принципы поведения моделируемого мира, действующие как порождающие грамматики в роли неких сил природы, или просто «сил».

Деревья (иерархии) 1–2 назовем метафизическими.

Данный граф представляет собой остов игрового поля разных порождающих грамматик. Причем человек, как наблюдатель, может вмешиваться в модель и осуществлять свой иррациональный выбор из вариантов, допускаемых генерацией выбора случайных правил порождающих грамматик «ассистированная человеком генерация» («НАГ»).

Ряд деревьев адресуется на граф-доску как фишки игры, это будут:

- 1) личность (субъект, как игровая фишка);
- 2) алгоритм глубины-действия-познания-рефлексии-...;
- 3) предмет, над которым осуществляются манипуляции.

В результате, граф-игра имеет три обобщенных раздела:

- 1) абстрактные объекты (критерии и понятийные единицы);
- 2) игровое поле;
- 3) деятели (actors) порождающих грамматик (субъекты и «силы» преобразований порождающих грамматик – гравитация, эффект трения и др.).

Субъекты и «силы» являются на игровом поле трансреса источниками ходов на основе правил порождающих грамматик Монтегю [1]. Моделируют игры разных форм массового сознания: научной, обиходной, эстетической и пр. В этой работе данная модель предлагается для геологической области.

Для эффективной работы с игровым графом требуется понятие – «трансвязь», то есть связь одного дерева или уровня дерева, адресуемая на другой уровень или на другое дерево. Трансвязи определенных типов могут быть запрещены правилами игр определенного типа.

### Простые предложения и программный код

Объектно-ориентированная парадигма (ООП) лучше всего подходит для выражения зависимостей признаков каких-либо предметов и действий, которые можно совершать над предметами или с помощью них. Предложения вроде «Эхолокатор функционирует» может иметь следующее отражение в программном коде:

```
eholokator.funktsioniruet();
```

Применяя текстокодую порождающую грамматику, программа порождает из программного кода предложение или предложения. Например, в вышеописанном фрагменте кода `eholokator` – объект, представитель какого-либо класса, способный совершать какие-либо действия (член предложения – подлежащее, с точки зрения семасиологической прагматики – actor). Метод `funktsioniruet` – глагол, действие или набор действий, которые может выполнить представитель класса (член предложения – сказуемое, action).

Набор правил порождающих грамматик конкретизируемого пространственно-временного формата для модификации объекта представлен ниже:

```
Actor > «Oborudovaniye.» | Subject > «оборудование»
«Oborudovaniye.» > «Eholokator.» | «оборудование» > «эхолокатор»
«Oborudovaniye.» > «GeneratorVibratsii.» | «оборудование» > «генератор вибраций»
«Oborudovaniye.» > «IzmeritelnyiPribor.» | «оборудование» > «измерительный прибор»
Action > funktsioniruet() | Verb > «работает»
```

funktsioniruet() > «rejimOjidaniya()» | «работает» > «работает в режиме ожидания»  
 funktsioniruet() > «rejimSkanirovaniya()» | «работает» > «работает в режиме сканирования»

Возможные предложения: «Эхолотокатор работает в режиме ожидания», «Генератор вибрации работает в режиме ожидания» и т. д. Эти и другие предложения генерируются в этой идеологии либо в виде текста, либо в виде кода (рис. 1, рис. 2), в результате чего классификация форматов включает те или иные объекты текстокода, представленного в форме

```
Interaction > TheActor.toManipulate(SomeIssue); // the 'Actor' needs to 'Manipulate' some 'Issue'
TheActor > TheCook
TheActor > TheUser
TheActor > TheMaker
TheMaker > TheCook
TheMaker > TheBuilder
toManipulate > toCook
toManipulate > toUse
toManipulate > toMake
SomeIssue > SomeFood
SomeFood > SomeCarrot
SomeFood > SomeCutlets
SomeBuilding > SomeLibrary
SomeBuildings > SomeCafe
'Actor' > cook
'Actor' > user
'Actor' > maker
'Manipulate' > cook
'Manipulate' > use
'Manipulate' > make
'Issue' > 'thing'
'Issue' > 'information'
'thing' > 'food'
'information' > 'book'
'food' > 'carrot'
```

Рис. 1. Порождающая грамматика; TheActor – деятель на игровом поле, toManipulate – алгоритмы, SomeIssue – предмет, над которым будет совершаться манипуляция [2, 3]

Fig. 1. Generative grammar; TheActor – an actor on the field, toManipulate – algorithms, SomeIssue – an object to be manipulated [2, 3]

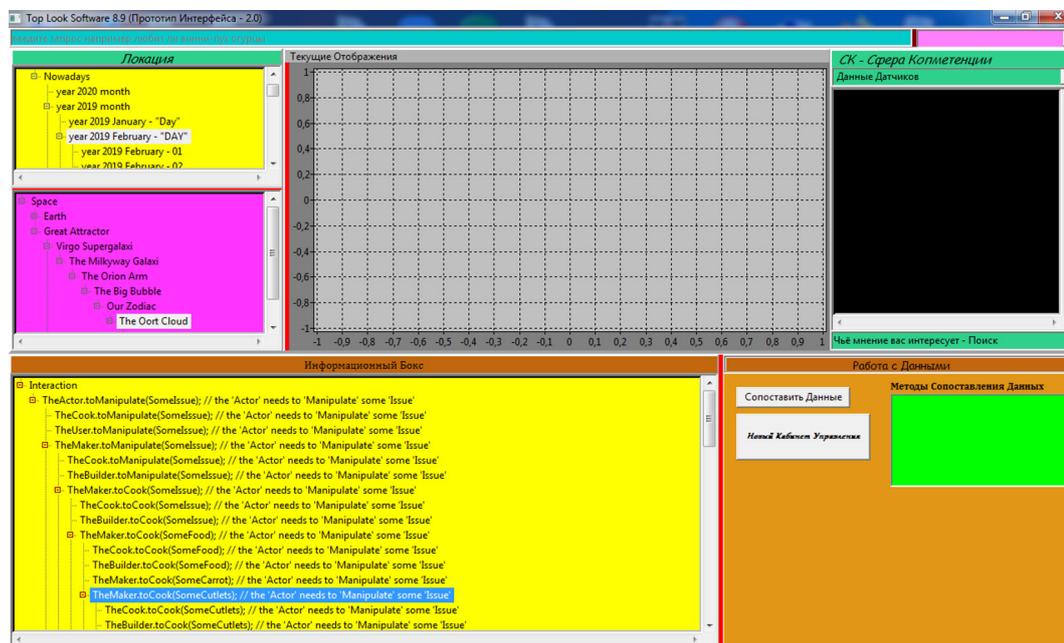


Рис. 2. Результат

Fig. 2. The result

семантико-прагматической онтологии. Разработанная система составляет семантические портреты текстов на основе модификации текстокода правилами порождающих грамматик над форматами данных. Под форматом мы понимаем расширение понятия объекта в парадигме ООП, когда выражение `Format1..Object1` экспортирует объект 1 в формат 1 для его последующей модификации на основе порождающих грамматик и для использования в теле кода на основе разных форматов и подформатов – пространственном, временном, организационном и др.

Ниже программа генерирует все возможные варианты (рис. 2). Также в программе в графе «Локация» приводится время и место.

Предлагается ввести дополнение в выражения порождающих грамматик. Пусть порождающая грамматика генерирует параллельно текст и код для работы на основе выражений:

```
TimeFormat..LocationFormat..Actor.Method(arg1, arg2, ..., argN),
```

где `TimeFormat` – время; `LocationFormat` – локация или место; `Actor` – деятель; `Method()` – действие или набор действий; `arg1, arg2, ..., argN` – предметы, над которыми выполняется действие.

Рассмотрим возможность применения условия как алгоритм или его часть. Например, начальник геологоразведательной экспедиции командует: «Установить инвентаризированное замерное оборудование».

В качестве программного кода это будет выглядеть следующим образом:

```
if (Oborudovaniye.inventarizirovanno == false)
{
    21Century..BolotistayaMestnost..Company.Ekspeditsiya.Enjiner.ustanovit(Oborudovaniye);
    Oborudovaniye.inventarizirovanno = true;
    21Century..BolotistayaMestnost..Company.Ekspeditsiya.Enjiner.dolojit(«Текущее оборудование
инвентаризировано»);
}
else //после else идет вариант, когда оборудование уже инвентаризировано —
{
    21Century..BolotistayaMestnost..Company.Ekspeditsiya.Enjiner.dolojit(«Текущее оборудова-
ние уже инвентаризировано»);
}
...
return 0;
```

Проблема подобной структуры в том, что форматов времени и локаций множество. Поэтому необходимо ввести понятие разбивочной категориальной сетки. Это совокупность значений, которые может принимать формат.

Например, формат зимы включает в себя декабрь, январь, февраль и никак не май, июнь, июль и т. д. Формат XX века включает в себя 1900–1999-е годы и никак не другие. Однако формат декабря может включать в себя любой год.

Что касается локаций, то, например, формат Евразии включает в себя такие страны, как Россия, Испания, Польша и т. д., но никак не Канаду.

Каждый ход всех порождающих грамматик синхронизирован со временем. Каждый ход над транслесом можно сделать с передвижкой маркера настоящего на дереве времени на позицию «Следующий». Маркер можно передвинуть на минуту, час или несколько часов.

Объединив все деревья с помощью транссвязей, можно смоделировать поведение людей и получившуюся модель использовать для предсказания событий (например, результат масштабной работы).

### **Алгоритм эволюционно оправданных экспансий**

Категориальная сетка системы – представление о мире и о системах с их когнитивной и семантической составляющей.

С точки зрения заявляемого подхода у любой системы есть метацель – благополучие; эта метацель может модифицироваться, переноситься с себя на других и на некое собирательное «мы». Цель элементов категориальной сетки системы оправданной экспансии – найти те форматы, в которых они могут помочь существованию, выживанию, благополучию системы и даже ее дальнейшей экспансии в надсистеме. Принципы баланса и сообразности вынуждена в большей или меньшей степени принимать любая система, что до определенной степени смягчает неконструктивные конфликты и дает системе заняться своей базовой целью. Такое описание применимо к любым системам, особенно к социальным, психологическим, информационным, семантическим, 1-, 2-языковым (естественные языки и языки программирования соответственно), маркетинговым и экономическим системам.

Пусть некто хочет купить окна. Подбор нужных окон начинается в сети Интернет. Поиск ведется как и на сайтах, так и по рекламным объявлениям. В зависимости от того, какие окна нужны потенциальному покупателю предлагаются рекламные объявления и сайты.

Задача рекламных агентств – сделать так, чтобы каждый покупатель нашел то, что ему нужно.

Тот, кто покупает окна, заботится о благополучии семьи (покупка таких окон, чтобы не было продувов). Те, кто занимаются рекламой, заботятся о благополучии покупателей (чтобы покупатели как можно быстрее нашли то, что нужно), организаций-исполнителей, магазинов (чтобы организации нашли своих покупателей и не обанкротились) и своего рекламного агентства.

Три стороны: организация по изготовлению окон, рекламное агентство и покупатель. Какой бы формат этих сторон не был активен – субъекты нацелены на благополучие себя или других субъектов.

### **Заключение**

В работе вводится новое понятие «транслес» (trans-forest). Это совокупность деревьев, связанных дополнительно: дерево форматов, дерево (иерархия) понятий, иерархия времени, а также просубъектный уровень некой материальной подложки субъектов («силы природы») и иррационального субъекта, аппроксимируемого в модели как граф модели всего мира, усвоенного некой умозрительной, предполагаемой нейросетью субъекта.

Субъекты и «силы» являются на игровом поле транслеса источниками ходов на основе правил порождающих грамматик Монтегю. Каждый ход над транслесом можно сделать с передвижкой маркера настоящего на дереве времени на позицию «Следующий».

Дерево форматов определяет то, какой субъект делает следующий ход или как субъект будет поступать в каких-либо ситуациях на постоянной основе. Для того чтобы приблизить модель к реальности, существуют транссвязи между деревьями и их разными уровнями.

Также предложенная модель поддерживает алгоритм эволюционно оправданных экспансий, цель которого обеспечение благополучия для самого субъекта и других субъектов. Субъект осуществляет эту цель через наиболее подходящие форматы.

Модель предназначена для моделирования геологических, учебных, языковых IT-маркетинговых и иных ситуаций с точки зрения теории графов и теории игр. В основном предложенная модель направлена на предсказание поведения людей, объяснение выбора людей и предсказание следующего выбора в области геологии и маркетинга.

#### Список литературы / References

[1] Montague R. Formal philosophy: Selected papers. New Haven-London: Yale University Press, 1974, 369.

[2] Личаргин Д. В. Порождение дерева состояний на основе порождающих грамматик над деревьями строк. *Сибирский журнал науки и технологий*, 2010, 1, 57–58 [Lichargin D. V. Generating a state tree based on generating grammatic over row trees. *Siberian Journal of Science and Technology*, 2010, 1, 57–58 (in Russian)].

[3] Сафонов К. В., Личаргин Д. В. Разработка векторизованной семантической классификации над словами и понятиями естественного языка. *Сибирский журнал науки и технологий*, 2009, 4, 33–37 [Safonov K. V., Lichargin D. V. Development of a vectorized semantic classification cations over words and concepts of natural language. *Siberian Journal of Science and Technology*, 2009, 4, 33–37 (in Russian)].