

# ВЕСТНИК

Магнитогорского государственного технического  
университета им. Г.И. Носова

2020. Т.18, №4

Журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (Перечень ВАК). Сведения о журнале содержатся в международных и российских базах данных: Ulrich's Periodicals Directory, Crossref, Google Scholar, RSCI на платформе Web of Science, ВИНТИ и др. Электронные версии журнала размещаются на сетевом ресурсе Научной Электронной Библиотеки в сети Интернет.

Издается с марта 2003 года

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Председатель редакционной коллегии  
В.М. Колокольников (Россия)

Ж.-Б. Вогт (Франция), В.Е. Громов (Россия),  
Я. Грум (Словения), М. Дабала (Италия),  
Х. Дыя (Польша), Р.О. Дюссан (Индия),  
Р. Кавалла (Германия), В.Н. Калмыков (Россия),  
Д.Р. Каплунов (Россия), А.Г. Корчунов (Россия),  
О.С. Логунова (Россия), Д. Милованович (Сербия),  
К. Мори (Япония), И. Мусирин (Малайзия),  
А.Б. Найзабеков (Казахстан), М. Пьетшик (Польша),  
В.Ф. Рашников (Россия), Г.А. Роджерсон (Великобритания),  
В.М. Счастливцев (Россия), О.Н. Тулупов (Россия),  
Ю Фенг (Китай), В.Р. Храмин (Россия),  
Р. Цин (Великобритания)

## РЕДАКЦИЯ

Главный редактор О.Н. Тулупов

Первый заместитель главного редактора  
М.А. Полякова

Заместители главного редактора:  
А.Г. Корчунов, О.С. Логунова,  
Н.Н. Орехова, В.Р. Храмин

Ответственный секретарь М.В. Шубина

Редактор Н.П. Боярова

Технический редактор И.В. Ключникова

Перевод на английский:

О.Е. Сухих, В.И. Елесина

© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2020

Подписной индекс издания 48603 в объединенном каталоге «Пресса России», том 1.

Также подписку в оперативном режиме можно оформить и оплатить в удобной для Вас форме на подписной страничке сайта Агентства «Книга-Сервис» по ссылке:

код html: <http://www.akc.ru/itm/vestnik-magnitogorskogo-gosudarstvennogo-tehnicheskogo-universiteta-im-gi-nosova/>

Свидетельство о регистрации ПИ №ФС 77-59632 от 10.10.2014 г.

Выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Учредитель – Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова.  
(455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, д. 38).

16+, в соответствии с Федеральным законом №436-ФЗ от 29.12.10.

### Адрес редакции:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск,  
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»  
пр. К. Маркса, 45/2, оф. 402  
Тел.: (3519) 22-14-93.  
URL: <http://www.vestnik.mgtu.ru>  
Email: [rio\\_mgtu@mail.ru](mailto:rio_mgtu@mail.ru); [vestnik@mgtu.ru](mailto:vestnik@mgtu.ru)

### Адрес издателя:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. К. Маркса, 45/2,  
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», издательский центр

### Адрес типографии:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38,  
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», участок оперативной полиграфии  
Выход в свет 25.12.2020. Заказ 365. Тираж 500 экз. Цена свободная.

# VESTNIK

of Nosov Magnitogorsk State Technical University

---

**2020. Vol.18, no.4**

---

The Journal is included in the List of Russian Peer-Reviewed Scientific Journals which are supposed to publish the major results of doctoral and PhD dissertations (the list issued by the Higher Attestation Commission). Information about the journal can be found in international and Russian databases: Ulrich's Periodicals Directory, Crossref, Google Scholar, RSCI on the Web of Science platform, VINITI (the All-Russian Institute of Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences), and others. The digital version of the Journal is available at eLIBRARY.RU.

**PUBLISHED SINCE MARCH, 2003**

## EDITORIAL BOARD MEMBERS

Head of the Editorial Board V.M. Kolokoltsev (Russia)

M. Dabala' (Italy), R.O. Dusane (India),  
H. Dyja (Poland), Ye Feng (China),  
V.E. Gromov (Russia), J. Grum (Slovenia),  
V.N. Kalmykov (Russia), D.R. Kaplunov (Russia),  
R. Kawalla (Germany), V.R. Khrashin (Russia),  
A.G. Korchunov (Russia), O.S. Logunova (Russia),  
D. Milovanovic (Serbia), K. Mori (Japan),  
I. Musirin (Malaysia), A.B. Naizabekov (Kazakhstan),  
M. Pietrzyk (Poland), R. Qin (UK), V.F. Rashnikov (Russia),  
G.A. Rogerson (UK), V.M. Schastlivtsev (Russia),  
O.N. Tulupov (Russia), J.-B. Vogt (France)

## EDITORIAL STAFF

Editor-in-Chief O.N. Tulupov

First Deputy Chief Editor M.A. Polyakova

Deputy Chief Editors:

A.G. Korchunov, O.S. Logunova,  
V.R. Khrashin, N.N. Orekhova

Executive Secretary M.V. Shubina

Editor N.P. Boyarova

Technical Editor I.V. Klyunnikova

Translated into English: O.E. Sukhikh, V.I. Elesina

© Federal State Budgetary Institution of Higher Education  
Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2020

Registration certificate PI # FS 77-59632 dated October 10, 2014 is issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media.

Founder – Nosov Magnitogorsk State Technical University  
(38, pr. Lenina, Magnitogorsk, Chelyabinsk Region, 455000)

16+ in accordance with Federal Law #436-FZ dated 29.12.10

## Editorial office:

402, 45/2 Karl Marks prospekt,  
Magnitogorsk, Chelyabinsk region, 455000, Russia  
Nosov Magnitogorsk State Technical University  
Phone: +7 (3519) 221 493.  
URL: <http://www.vestnik.mgtu.ru>  
Email: [rio\\_mgtu@mail.ru](mailto:rio_mgtu@mail.ru); [vestnik@mgtu.ru](mailto:vestnik@mgtu.ru)

## Publisher office:

45/2 Karl Marks prospekt, Magnitogorsk, Chelyabinsk region, 455000, Russia  
Nosov Magnitogorsk State Technical University

## Printing office:

38 Lenin prospekt, Magnitogorsk, Chelyabinsk region, 455000, Russia  
Nosov Magnitogorsk State Technical University

Publication date: 25.12.2020. Order 365. Circulation: 500. Open price.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Разработка полезных ископаемых .....</b>	<b>4</b>
<i>Гришин И.А., Масалимов А.В., Андреева О.С.</i> Непрерывный контроль как инструмент управления процессом обогащения магнетитов .....	4
<i>Евдокимов С.И., Герасименко Т.Е., Троценко И.Г.</i> Технико-экономическое обоснование эффективности совместной переработки руд и россыпей золота .....	12
<b>Обработка металлов давлением .....</b>	<b>24</b>
<i>Соседкова М.А., Григоренко А.С., Радионова Л.В.</i> Математическая модель расчета температуры металла на стане горячей листовой прокатки .....	24
<i>Полецков П.П., Кузнецова А.С., Алексеев Д.Ю., Никитенко О.А., Лопатина Е.В.</i> Анализ мирового уровня разработок в области производства горячекатаного высокопрочного хладостойкого листового проката с пределом текучести $\geq 600$ Н/мм <sup>2</sup> .....	32
<b>Технологии обработки материалов .....</b>	<b>39</b>
<i>Дегтярева-Кашутина А.С., Дьяконов А.А.</i> Методика проектирования высокоэффективных циклов круглого врезного шлифования .....	39
<i>Антонов А.Ю., Данилаев Д.П.</i> Модернизация станков с ЧПУ на предприятии ОПК .....	48
<i>Сулаберидзе В.Ш., Скорнякова Е.А.</i> Оценка параметров расчетных моделей теплопроводности композиционных материалов с полимерным связующим по экспериментальным данным .....	57
<b>Энергетика металлургии, энергосбережение и электротехнические комплексы .....</b>	<b>65</b>
<i>Нигаматуллин Р.М.</i> Расчёт доли регулирующего эффекта нагрузки в отклонении напряжения на распределительной шине .....	65
<b>Международная деятельность .....</b>	<b>71</b>
<i>Корчунов А.Г.</i> Юбилейная международная молодежная научно-практическая конференция «Magnitogorsk Rolling Practice 2020» .....	71

## CONTENTS

<b>Mining and Mineral Processing .....</b>	<b>4</b>
<i>Grishin I.A., Masalimov A.V., Andreeva O.S.</i> On-Line Analytical Control as a Tool for Managing a Magnesite Enrichment Process .....	4
<i>Evdokimov S.I., Gerasimenko T.E., Trotsenko I.G.</i> Feasibility Study of the Joint Processing of Gold Ores and Placers .....	12
<b>Metal Forming.....</b>	<b>24</b>
<i>Sosedkova M.A., Grigorenko A.S., Radionova L.V.</i> Mathematical Modeling of Steel Temperature on a Hot Sheet Rolling Mill .....	24
<i>Poletskov P.P., Kuznetsova A.S., Alekseev D.Yu., Nikitenko O.A., Lopatina E.V.</i> Analysis of Global Development in Producing Hot-Rolled High-Strength Cold-Resistant Sheets with a Yield Strength of 600 MPa and over.....	32
<b>Material Process Engineering .....</b>	<b>39</b>
<i>Degtyareva-Kashutina A.S., Dyakonov A.A.</i> Method of Designing Highly Efficient Cycles of Cylindrical Plunge Grinding .....	39
<i>Antonov A.Yu., Danilaev D.P.</i> Modernization of CNC Machines in a Defense Enterprise .....	48
<i>Sulaberidze V.Sh., Skorniakova E.A.</i> Estimation of Thermal Conductivity Calculation Model Parameters for Composite Materials with a Polymer Binder Based on Experimental Data .....	57
<b>Metallurgical Power Engineering, Energy Saving and Electrical Systems .....</b>	<b>65</b>
<i>Nigamatullin R.M.</i> Calculation of a Share of the Load Regulating Effect in the Distribution Busbar Voltage Deviation .....	65
<b>International Activities .....</b>	<b>71</b>
<i>Korchunov A.G.</i> Anniversary International Youth Scientific and Practical Conference Magnitogorsk Rolling Practice 2020 .....	71

# РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ MINING AND MINERAL PROCESSING

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 622.7.092

DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-4-4-11



## НЕПРЕРЫВНЫЙ КОНТРОЛЬ КАК ИНСТРУМЕНТ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОБОГАЩЕНИЯ МАГНЕЗИТОВ

Гришин И.А., Масалимов А.В., Андреева О.С.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

**Аннотация.** Эффективность процессов переработки минерального сырья определяется скоростью и точностью получения данных о процессе. Эти факторы позволяют оперативно реагировать на колебания в элементном и минеральном составе сырья с принятием своевременных корректирующих действий – регулирование процесса переработки. В связи с этим применение экспресс-методов анализа положительно сказывается на технологических показателях обогащения минерального и техногенного сырья. Данной актуальной задаче посвящена работа по изучению возможности применения непрерывного рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) отсеков магнезита, а также его применение для управления процессом обогащения этого сырья. Целью работы было установление степени влияния непрерывного рентгенофлуоресцентного анализа на эффективность процесса переработки. В работе определен элементный и минеральный состав отсеков магнезита Саткинского месторождения, проведены опыты по получению магнезии бикарбонатным методом с использованием традиционной методики аналитического контроля и с применением непрерывного рентгенофлуоресцентного анализа. Установлено, что непрерывный контроль позволяет повысить качество получаемого продукта на 0,4% по содержанию MgO. Сравнение погрешностей результатов химического и непрерывного рентгенофлуоресцентного анализа показало, что существенных различий по точности между этими методами нет. Разница в результатах анализа массовой доли MgO в продукте составила 0,4%. По работе сделан вывод о том, что применение непрерывного контроля продуктов в потоке является перспективным направлением, которое может повысить эффективность процессов переработки минерального сырья за счет уменьшения периода времени между получением результата анализа и проведением корректирующего воздействия на процесс обогащения.

**Ключевые слова:** магнезит, аналитический контроль, непрерывный анализ, неразрушающий контроль.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FZRU-2020-0011).*

© Гришин И.А., Масалимов А.В., Андреева О.С., 2020

### Для цитирования

Гришин И.А., Масалимов А.В., Андреева О.С. Непрерывный контроль как инструмент управления процессом обогащения магнезитов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №4. С. 4–11. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-4-4-11>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

## ON-LINE ANALYTICAL CONTROL AS A TOOL FOR MANAGING A MAGNESITE ENRICHMENT PROCESS

Grishin I.A., Masalimov A.V., Andreeva O.S.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

**Abstract.** The efficiency of mineral processing is determined by speed and accuracy of receiving process data. These factors make it possible to quickly respond to fluctuations in the elemental and mineral composition of raw materials and take timely corrective actions, namely the regulation of the processing. Consequently, the use of rapid analysis methods has a positive impact on technological indicators of enrichment of mineral and technology-related raw materials. This currently important objective is described in this paper on studying the possibility of using the continuous X-ray fluorescence analysis (XRF) of magnesite screenings, as well as its use for controlling the enrichment process of such raw materials. The aim of the research was to establish the degree of influence of the continuous X-ray fluorescence analysis on the efficiency of the processing. The paper outlines the elemental and mineral composition of magnesite screenings from the Satka deposit, and the experiments carried out to obtain magnesia by the bicarbonate method using a conventional analytical control method and the continuous X-ray fluorescence analysis. It was found that continuous monitoring improves the quality of the resulting product by 0.4% in terms of MgO content. The comparison of the errors of the chemical and continuous X-ray fluorescence analyses showed that there were no significant differences in accuracy between these methods. The difference in the analysis results of the mass fraction of MgO in the product was 0.4%. This research brings us to the conclusion that continuous on-line control of products in the flow is promising as it increases the efficiency of mineral processing by reducing the time period between receiving the analysis result and carrying out a corrective action on the enrichment process.

**Keywords:** magnesite, analytical control, on-line analysis, non-destructive testing.

*The research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FZRU-2020-0011).*

### For citation

Grishin I.A., Masalimov A.V., Andreeva O.S. On-Line Analytical Control as a Tool for Managing a Magnesite Enrichment Process. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020, vol. 18, no. 4, pp. 4–11. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-4-4-11>

В настоящее время для ведения технологического процесса в оптимальных условиях необходимо знать химический состав поступающего в производство сырья и конечного продукта. Развитие систем автоматизации и поточных экспресс-анализаторов дает возможность получать данные о химическом составе сыпучих материалов прямо на конвейерной ленте.

Одной из основных задач технологии является производство продуктов с постоянными параметрами. Таким образом, для задач управления технологическими процессами одной из целей аналитического контроля является определение химического состава партии материала.

Ошибка измерения химического состава партии материала определяется ошибкой пробоотбора и пробоподготовки и инструментальной ошибки анализа.

Под традиционными методами понимается отбор проб из потока материала с последующей их разделкой и подготовкой для химического анализа в лаборатории [1–3]. Непрерывный же контроль подразумевает установку анализатора

непосредственно в потоке материала и определение химического состава материала физическими и физико-химическими методами. Широкое распространение при этом получил метод рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) [4].

Ввиду гранулометрической и петрографической неоднородности анализируемых сыпучих материалов [5, 6] отбираемые пробы не представляют по своему составу всю массу материала. Кроме того, на отбор и подготовку проб, доставку их до лаборатории и проведение анализа уходит достаточно много времени, что выражается в том, что результат химического анализа поступает технологическому персоналу тогда, когда материал, соответствующий отобранной пробе, уже был передан в производство, и введение поправок невозможно. Системы непрерывного анализа на базе рентгенофлуоресцентного анализатора позволяют определять химический состав сырья в течение нескольких минут [6, 7].

Описанные выше различия при применении поточного и традиционного метода определения среднего химического состава партии материала



широко известны в литературе, однако это оценки исключительно качественные и не дают информации о количественных данных по разнице при определении среднего химического состава партии материала.

Отсевы магнезита фракции 0–8 мм являются одним из возможных видов магнезиального сырья, который может быть использован для производства высокочистого оксида магния. Минералогический, гранулометрический и химический состав отсеков, взятых для исследований, представлен в табл. 1–3 соответственно.

Таблица 1. Фазово-минеральный состав магнезитов Саткинского месторождения

Table 1. The phase and mineral composition of magnesites from the Satka deposit

Минерал	Содержание минерала, объёмных %	
	Минимум	Максимум
Магнезит	83	98
Доломит	1	13
Кварц	1	6
Алюмосиликаты	1	4
Гальк (3MgO·4SiO <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O)	0	2
Пирит	1	2

Отсевы магнезита фракции -8,0+0,0 мм Саткинского месторождения характеризуются неоднородным гранулометрическим составом. Такая

неоднородность может оказывать влияние на химический состав получаемой магнезии.

Установлено, что фракция -0,5+0,0 мм содержит на 0,5% больше кремнезема и на 0,6% оксида магния, чем в среднем в исходном сырье.

Такое неравномерное распределение компонентов при переработке магнезиального сырья создает сложности, связанные с необходимостью своевременной регулировки параметров технологического процесса. Для того чтобы оперативно регулировать технологические параметры, необходимо точно и оперативно знать химический состав материала, приходящего на переработку. Для этого необходимо обеспечить оперативный аналитический контроль.

В ходе аналитического контроля необходимо следовать общепринятому и отработанному алгоритму, включающему следующие этапы: отбор представительной пробы, её сокращение, подготовку и химический анализ.

Этапы аналитического контроля состоят из многочисленных операций, требующих значительных затрат времени и ресурсов. При этом каждый этап включает в себя как объективные, так и субъективные источники ненадежности. Поэтому, вычисляя общую погрешность результатов всего аналитического контроля, необходимо суммировать случайные и систематические погрешности, которые возникли при выполнении всех этапов контроля.

Таблица 2. Результаты распределения MgO в отсевах магнезита фракции -8,0 мм Саткинского месторождения

Фракция	Партия №1	Партия №2	Партия №3	Партия №4	Среднее
+ 2,0	48,73%	34,10%	15,59%	13,43%	27,96%
-2,0+1,0	32,00%	27,15%	19,48%	18,26%	24,22%
-1,0+0,5	10,66%	16,21%	19,28%	20,14%	16,57%
-0,5+0,1	3,44%	14,58%	33,23%	43,83%	23,77%
-0,100+0,063	0,77%	2,12%	4,58%	1,59%	2,27%
-0,063+0,000	4,40%	5,84%	7,84%	2,74%	5,21%

Таблица 3. Средний химический состав отсеков магнезита фракции -8,0+0,0 мм Саткинского месторождения

Образец	Массовая доля, %						
	MgO	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	S	ППП
Непрокаленный	44,04	2,22	0,50	1,83	0,96	0,15	49,43
Прокаленный	89,1	4,5	1,01	3,7	1,95	0,31	-

В табл. 4 приведено сравнение классического аналитического контроля с отбором проб и анализом их в лаборатории (off-line) и непрерывный аналитический контроль непосредственно в технологическом потоке (on-line) [8].

Таблица 4. Сравнение характеристик видов аналитического контроля  
Table 4. Comparison of types of analytical control

Критерий сравнения	Аналитический контроль с отбором проб (off-line)	Непрерывный аналитический контроль с отбором проб (on-line)
Полная ошибка анализа	$S_{\Sigma}^2 = S_{п.о.}^2 + S_{п.п.}^2 + S_{ан}^2$	$S_{\Sigma}^2 = S_{ан}^2$
Длительность анализа	От 1 до 4 часов	1,5–10 минут
Масса отбираемой пробы	5–10 кг	50–70 кг
Масса анализируемой пробы	1–10 грамм	50–70 кг

Для оценки применимости непрерывного аналитического контроля методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) были исследованы образцы магнезита, и методом РФА в условиях полупромышленной установки определена массовая доля кальция и железа в контролируемом продукте. Для работы использовался спектрометр CON-X 02 производства Baltic Scientific Instruments (г. Рига). Условия измерения представлены в табл. 5.

Таблица 5. Характеристики установки химического анализа  
Table 5. Technical data of the chemical analysis facility

Анализатор	CON-X 02
Материал анода рентгеновской трубки	Mo
Фильтр первичного излучения	Не применялся
Напряжение на аноде, кВ	30
Анодный ток, мкА	300
Энергетическое разрешение детектора, эВ	150
Время измерения, с	30
Среда измерения	Воздух
Расстояние между поверхностью образца и детектором, мм	50±3

Определение магния в условиях существования воздушной прослойки между спектрометром и измеряемым материалом не представляется технически возможным. На рис. 1 и 2 представлены результаты определения массовой доли кальция и железа методом РФА.

Как видно из данных, спектрометр CON-X 02 принципиально позволяет определять массовую долю железа и кальция в потоке. Для оценки точности измерений нами были проведены опыты с использованием потока отсеков магнезита на действующем предприятии. Отсевы магнезита пропускались непрерывным потоком под спектрометром со скоростью 0,5 м/с. Каждые 30 с из потока отсекалась проба массой 64 кг, которая после сокращения и подготовки отправлялась на химический анализ. На рис. 3 показан результат сравнения анализа потока отсеков магнезита в результате традиционного отбора проб и непрерывного сканирования потока спектрометром.

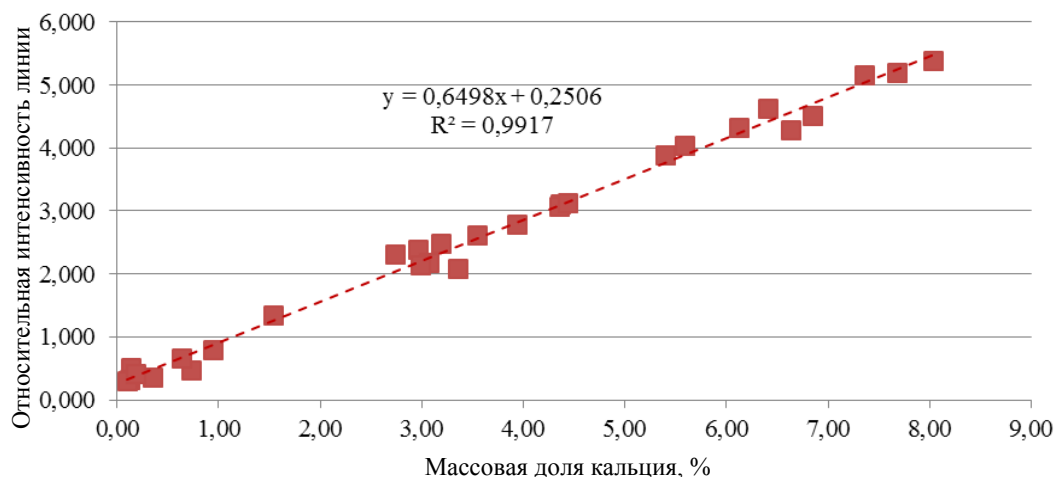


Рис. 1. Интенсивность характеристической линии кальция в зависимости от состава магнезита

Fig. 1. Intensity of a calcium characteristic line depending on the magnesite composition

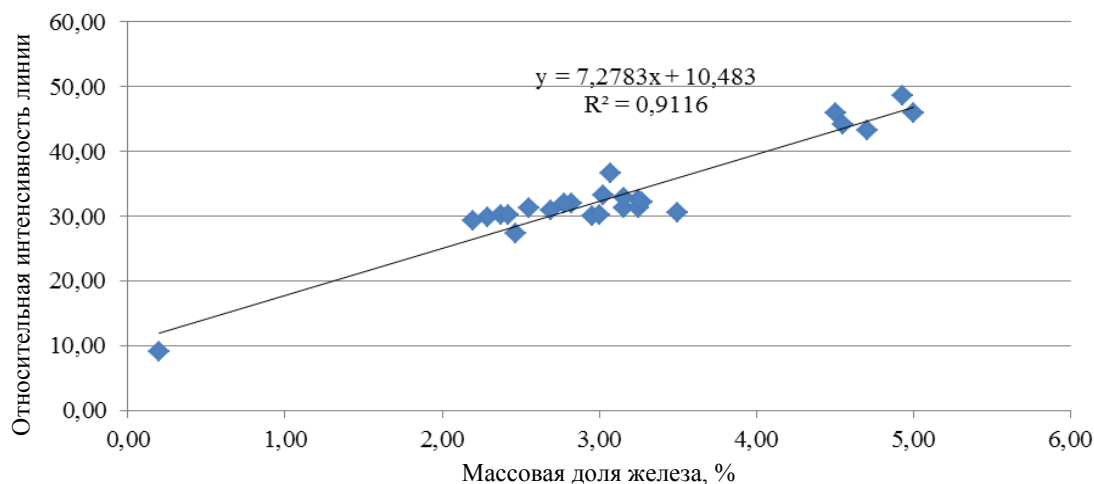


Рис. 2. Интенсивность характеристической линии железа в зависимости от состава магнезита

Fig. 2. Intensity of an iron characteristic line depending on the magnesite composition

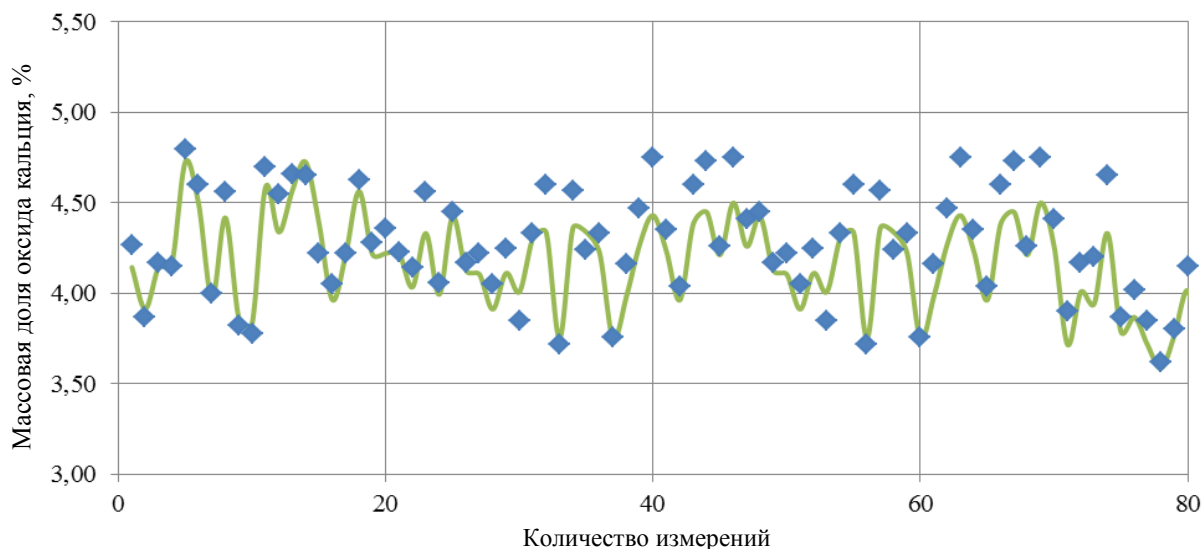


Рис. 3. Сравнение результатов анализа массовой доли кальция в технологическом потоке (Сплошная линия – результат непрерывного анализа с помощью РФА, точки – результат традиционного химического анализа с методикой отбора проб)

Fig. 3. Comparison of the on-line process analyses of the calcium mass fraction (A solid line is a continuous analysis using XRF, a dotted line is a conventional chemical analysis with a sampling method)

На основании полученных данных можно заключить, что непрерывный анализ достаточно эффективен при контроле элементного состава магнезитов. Ошибка анализа, определенная как среднеквадратичное отклонение, между результатами анализа при отборе проб и результатами непрерывного контроля составила 0,4% абс.

В работах [9, 10] рассматриваются процессы обогащения отсеков магнезита. При этом в работе [9] приведена математическая модель, описывающая процесс обогащения отсеков магнезита, позволяющая определять химический состав продукта обогащения и условия обогащения, опираясь на

известный химический состав входящих отсеков магнезита.

Для изучения возможности управления технологическим процессом на основе данных РФА анализа была взята партия отсеков магнезита массой 100 кг. Партия была усреднена и отобраны пробы на химический анализ. После этого партия была разделена на две части, из которых также отобраны пробы на химический анализ. В первой серии обогащение отсеков магнезита велось на основании результатов среднего химического анализа отобранных проб. Во второй серии экспериментов обогащение шло на основе анализа химического состава спектрометром в не-



прерывном режиме. Параметры обогащения определялись согласно математической модели [9, 10]. Ввиду того что в ходе непрерывного анализа невозможно определять массовую долю магния напрямую, она определялась расчетным методом по разности между суммой карбонатов по данным химических анализов и суммой карбонатов кальция и железа, полученных из ре-

зультатов непрерывного анализа потока материала. На **рис. 4 и 5** показан конечный результат процесса обогащения отсеков магнезита при регулировании процесса на основании анализа с пробоотбором и с использованием непрерывного РФА-контроля. Для определения эффективности обогащения контролировались исходное сырье и конечный продукт процесса переработки.

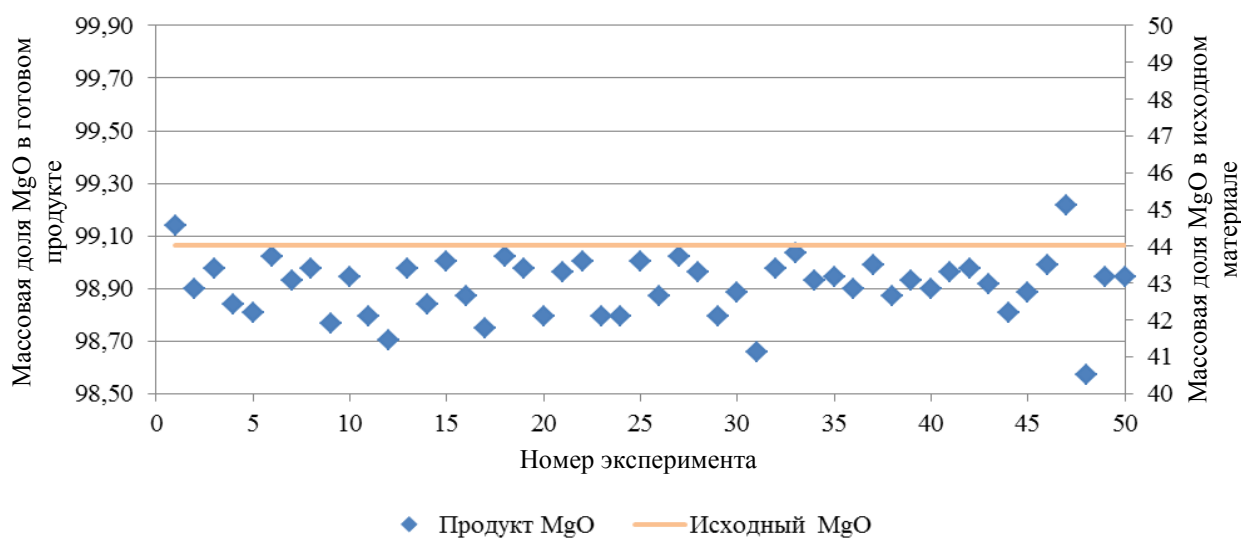


Рис. 4. Результаты обогащения отсеков магнезита на основе информации химических анализов путем взятия проб  
Fig. 4. Magnesite screenings enriched on the basis of chemical analyses by sampling

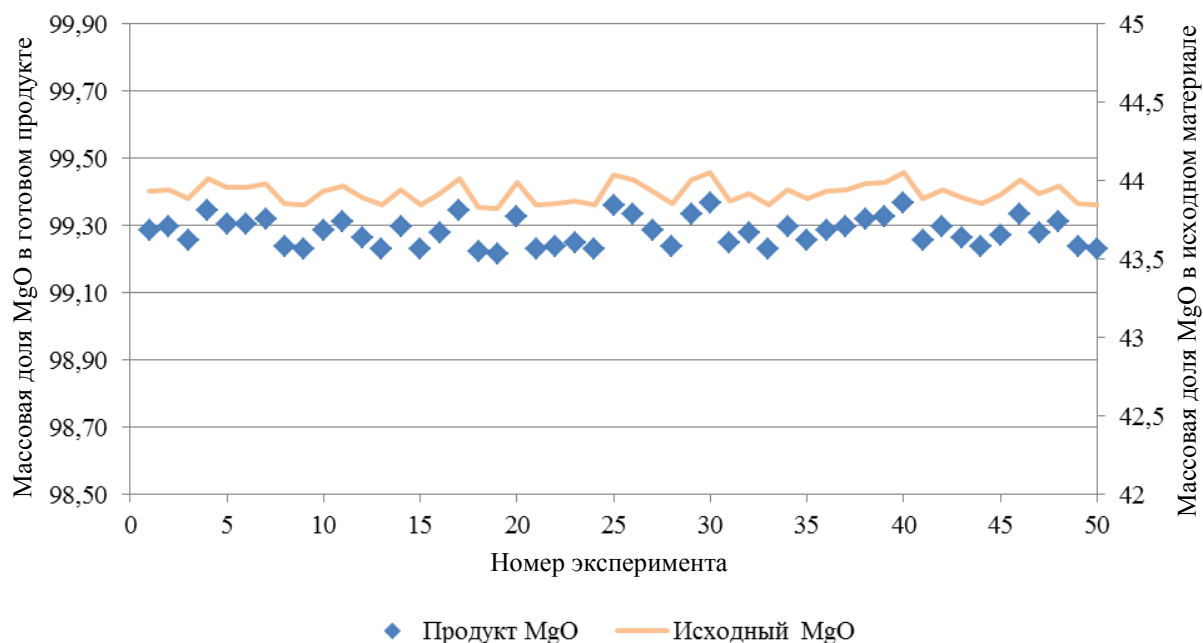


Рис. 5. Результаты обогащения отсеков магнезита на основе информации непрерывного анализа  
Fig. 5. Magnesite screenings enriched on the basis of the continuous analysis

Как видно из **рис. 4, 5**, при применении непрерывного анализа снижается амплитуда колебаний массовой доли MgO и повышается на 0,4% ее величина в конечном продукте. Это связано с тем, что при использовании непрерывного анализа для каждой части партии определяются оптимальные условия обогащения, в то время как при использовании результатов химического анализа и определении среднего состава партии не учитываются не-

однородности состава и обогащение ведется при постоянных параметрах.

Исходя из вышеизложенного, применение непрерывного контроля продуктов в потоке является перспективным направлением, которое может повысить эффективность процессов переработки минерального сырья за счет уменьшения периода времени между получением результата анализа и проведением корректирующего воздействия на процесс обогащения.

#### Список литературы

1. Иеллепеди Р., Кохлер А., Бонвин Д. Контроль технологического процесса и качества продукции в производстве алюминия с использованием рентгенофлуоресцентного / рентгенодифракционного спектрометра ARL 9800S XRF-XRD // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 1998. Т. 64. № 12. С. 60–64.
2. Ymasaki H. A off-line analysis ad on-line analysis/ J. Soc. Instrum. and Contr. Eng. 1988. V. 27. No. 11. P. 961–967.
3. Clarke J.R.P. Sampling for process analysis/ Anal. Proc. 1987. V. 24. No. 7. P. 210.
4. Роттер Р. Непрерывный рентгеноспектральный анализ и его применение к автоматизации производственных процессов // Заводская лаборатория. 1964. Т. 30. № 4. С. 436–438.
5. Андреев А.Е., Власов В.В. Оценка существующей системы контроля качества губчатого титана // Заводская лаборатория. 1969. Т. 35. № 7. С. 827–831.
6. Основной источник погрешностей при рентгенофлуоресцентном анализе железорудных смесей / Ушеров А.И., Алов Н.В., Волков А.И., Ишметьев Е.Н., Полушкин М.Е., Вдовин К.Н., Ушерова Е.В., Шипилова Н.А. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2009. Т. 75. № 3. С. 25–26.
7. Непрерывный контроль химического состава сульфидной медно-цинковой руды / Ушеров А.И., Ишметьев Е.Н., Ляпин А.Г., Ямщиков А.В., Цыгалов А.М. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2014. Т. 80. №4. С. 69–73.
8. Карпов Ю.А., Савостин А.П. Методы пробоотбора и пробоподготовки. М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2003. 250 с. ISBN: 5-94774-081-8
9. Highly reactive magnesia production: modeling and experiment / M.Y. Turchin, A.V. Masalimov, A.N. Smirnov, I.A. Grishin // Refractories and Industrial Ceramics. 2019. Т. 60. № 3. С. 254–257.
10. Определение рациональных параметров бикарбонатного способа получения магнезии / А.Н. Смирнов, А.В. Масалимов, В.И. Сысоев, И.И. Зайнуллин // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы 77-й междунар. науч.-техн. конф. 2019. С. 228–229.

#### References

1. Yellepeddi R., Kohler A., Bonvin D. Control of the technological process and product quality in aluminum production using X-ray fluorescence / X-ray diffraction spectrometer ARL 9800S XRF-XRD. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Industrial Laboratory. Materials Diagnostics], 1998, vol. 64, no. 12, pp. 60–64. (In Russ.)
2. Ymasaki H. An off-line analysis ad on-line analysis. J. Soc. Instrum. and Contr. Eng. 27, 11, 961–967 (1988).
3. Clarke J.R.P. Sampling for process analysis. Anal. Proc. 24, 7, 210 (1987).
4. Rotter R. Continuous X-ray spectral analysis and its application to the automation of production processes. *Zavodskaya laboratoriya* [Industrial Laboratory], 1964, vol. 30, no. 4, pp. 436–438. (In Russ.)
5. Andreev A.E., Vlasov V.V. Assessment of the existing quality control system for titanium sponge. *Zavodskaya laboratoriya* [Industrial Laboratory], 1969, vol. 35, no. 7, pp. 827–831. (In Russ.)
6. Usharov A.I., Alov N.V., Volkov A.I., Ishmetiev E.N., Polushkin M.E., Vdovin K.N., Usherova E.V., Shipilova N.A. The main source of errors in the X-ray fluorescence analysis of iron ore mixtures. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Industrial Laboratory. Materials Diagnostics], 2009, vol. 75, no. 3, pp. 25–26. (In Russ.)
7. Usharov A.I., Ishmetiev E.N., Lyapin A.G., Yamshchikov A.V., Tsygalov A.M. Continuous control of the chemical composition of sulfide copper-zinc ore. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Industrial Laboratory. Materials Diagnostics], 2014, vol. 80, no. 4, pp. 69–73. (In Russ.)
8. Karpov Yu.A., Savostin A.P. *Metody probootbora i probopodgotovki* [Methods of sampling and sample preparation]. Moscow: BINOM, Knowledge Laboratory, 2003, 250 p. ISBN: 5-94774-081-8 (In Russ.)
9. Turchin M.Y., Masalimov A.V., Smirnov A.N., Grishin I.A. Highly reactive magnesia production: modeling and experiment. *Refractories and Industrial Ceramics*. 60, 3, 254–257 (2019).
10. Smirnov A.N., Masalimov A.V., Sysoev V.I., Zaynullin I.I. Determination of rational parameters of the bicarbonate method for producing magnesia. *Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya: tezisy 77-y mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konf.* [Current problems of modern science, technology and education: proceedings of the 77th International Scientific and Technical Conference]. 2019, pp. 228–229. (In Russ.)

Поступила 06.11.2020; принята к публикации 08.12.2020; опубликована 25.12.2020  
Submitted 06/11/2020; revised 08/12/2020; published 25/12/2020

**Гришин Игорь Анатольевич** – кандидат технических наук, заведующий кафедрой геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: igorgi@mail.ru. ORCID 0000-0001-8010-7542

**Масалимов Алексей Валерьевич** – аспирант,  
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.

**Андреева Оксана Сергеевна** – студентка,  
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.

**Igor A. Grishin** – PhD (Eng.), Head of the Department of Geology, Mine Surveying and Mineral Processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: igorgi@mail.ru. ORCID 0000-0001-8010-7542

**Alexey V. Masalimov** – postgraduate student,  
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Oxana S. Andreeva** – student, Department of Geology, Mine Surveying and Mineral Processing,  
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 622.765

DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-4-12-23



## ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОВМЕСТНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ РУД И РОССЫПЕЙ ЗОЛОТА

Евдокимов С.И., Герасименко Т.Е., Троценко И.Г.

Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет),  
Владикавказ, Россия

**Аннотация. Постановка задачи:** горизонтальная интеграция золотодобывающих предприятий различной производственной мощности решает актуальную задачу увеличения производства золота за счет освоения месторождений с небольшим запасом золота, а также техногенных отходов с получением экономического эффекта. **Цель работы:** разработка организационно-технологического подхода к совместному освоению (например, холдингом) группы территориально сближенных золотосодержащих объектов, отличающихся запасами золота, при котором за счет эффекта масштаба достигается операционная синергия: при сохранении производственных мощностей и численности работников удельные инвестиционные, технологические и организационные затраты уменьшаются; холдинг приносит большую совокупную стоимость, чем действия отдельных предприятий в сумме. **Новизна:** выявлена и обоснована возможность совместной переработки золотосодержащих руд и техногенных отходов россыпной золотодобычи, что дает возможность рассматривать их минерально-сырьевые базы как запасы единого месторождения, отрабатываемые предприятиями холдинга, что обеспечивает снижение удельных капитальных вложений и эксплуатационных затрат за счет увеличения производственной мощности предприятия. **Результат:** подтверждена высокая технологическая эффективность извлечения золота флотацией из искусственной шихты, составленной из тяжелого шлиха, выделенного из гале-эфельных отвалов гравитационными методами обогащения, и руд коренного месторождения золота. Результаты лабораторных исследований использованы при моделировании денежных потоков при совместной переработке этих георесурсов. Критериями оценки технологии выбраны чистый денежный доход и внутренняя норма доходности. **Практическая значимость:** значения экономических критериев позволяют рассматривать совместную переработку руд и россыпей золота с применением разработанных технологических решений как экономически эффективный инновационный проект.

**Ключевые слова:** рудное золото, техногенная россыпь, совместная переработка, гравитация, флотация, экономическая оценка.

© Евдокимов С.И., Герасименко Т.Е., Троценко И.Г., 2020

### Для цитирования

Евдокимов С.И., Герасименко Т.Е., Троценко И.Г. Техничко-экономическое обоснование эффективности совместной переработки руд и россыпей золота // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №4. С. 12–23. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-4-12-23>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

## FEASIBILITY STUDY OF THE JOINT PROCESSING OF GOLD ORES AND PLACERS

Evdokimov S.I., Gerasimenko T.E., Trotsenko I.G.

North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia

**Abstract. Problem Statement:** A horizontal integration of gold mining enterprises of various production capacity solves the urgent problem of increasing gold production by developing deposits with a small stock of gold, as well as man-made waste with an economic effect. **Objectives:** Development of an organizational and technological approach to the joint development (for example, by a holding) of a group of geographically close gold-bearing facilities, differing in gold reserves, and operational synergy is achieved due to economies of scale. While maintaining production capacity and number of employees, specific investment, technological and organizational costs decrease; the holding brings in more aggregate value than operations of individual enterprises in total. **Originality:** The authors revealed and substantiated the joint processing of gold-bearing ores and man-made waste from alluvial gold mining, which made it possible to consider their mineral resource bases as reserves of a single deposit developed by the holding's enterprises, while reducing specific capital expenditure and operating cost by increasing the production capacity of the enterprise. **Findings:** The research proved high technological efficiency of gold recovery by flotation from an artificial charge made up of heavy concentrate separated from boulders and dredging waste by gravity concentration methods and ores of the primary gold deposit. The laboratory studies were used to simulate cash flows resulting from the joint processing of these georesources. The technology assessment criteria are net cash income and internal rate of return. **Practical Relevance:** The values of the economic criteria allow us to consider the joint processing of ores and placers of gold using the developed technological solutions as a cost-effective innovative project.

**Keywords:** ore gold, technology-related placer, joint processing, gravity, flotation, economic assessment.

### For citation

Evdokimov S.I., Gerasimenko T.E., Trotsenko I.G. Feasibility Study of the Joint Processing of Gold Ores and Placers. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020, vol. 18, no. 4, pp. 12–23. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-4-12-23>

### Введение

За период интенсивного освоения россыпей золота в России накоплено около 110 млрд т отвалов. С ними потеряно от 25 до 75% золота от его количества в россыпи, что составляет 7–12% в структуре ресурсов и запасов золота РФ [1–7].

Добыча золота из россыпи выгодна при выработке 1–3 кг золота в год на человека. Однако при содержании в техногенных отходах золота на уровне 100–150 мг/м<sup>3</sup> количества добываемого металла недостаточно для окупаемости капитальных вложений в приемлемые для инвестора сроки [8–11].

Для крупных вертикально-интегрированных холдингов освоение месторождений с небольшим запасом золота (а также доработка старых месторождений после достижения определенных технологических и экономических границ) в условиях несовершенства налоговой системы, резких изменений конъюнктуры и цен на мировых рынках металлов становится экономически нецелесообразной: капитальные вложения в строительство ЗИФ достигают US\$ 43–50 на 1 т

годовой переработки руды, инвестиционные циклы длительные (до 10 лет), рентабельность производства низкая (0–10%) [12–15].

В звене «спрос-предложение» техногенные отходы приобретут свойство инвестиционного товара при условии, что их будут отрабатывать малые предприятия (артели старателей) высокопроизводительными технологиями [16].

Увеличение производственной мощности предприятия возможно за счет горизонтальной интеграции (слияния и поглощения – mergers and acquisitions – M&A) территориально сближенных объектов, например руд со средними и россыпей с малыми запасами золота. Объекты в группе осваивают последовательно или параллельно как участки одного крупного месторождения (холдингом). За счет эффекта масштаба достигается операционная синергия: при сохранении производственных мощностей и численности работников удельные инвестиционные, технологические и организационные затраты уменьшаются; холдинг приносит большую совокупную стоимость, чем действия отдельных предприятий в сумме [17–19].



Значимыми доводами в пользу освоения небольших запасов малыми предприятиями (в форме ООО, производственных кооперативов) выступают такие аргументы, как: скромные требования к инфраструктуре при сезонном режиме работы, быстрый ввод в эксплуатацию производственных мощностей, оперативность реагирования на изменение внешних условий, высокая ликвидность, отсутствие рисков, связанных с падением на фондовом рынке цен на акции и необходимости выплаты дивидендов акционерам, выплаты процентов по инвестициям и кредитам менее обременительны, возможна экономия за счет создания новой системы управления [20].

### **Теория, материалы и методы исследования, технические и технологические разработки**

Объектами исследования были техногенные отвалы промывки россыпи золота р. Омчак и проба золотосодержащих руд месторождения Павлик (Магаданская обл.).

Техногенные отвалы образованы при промывке песков золото-кварцевой аллювиальной долинной россыпи гидрозелеватормыми промприборами (типа ПГШ).

В техногенных отвалах золото мелкое и тонкодисперсное: более 85% металла заключено во фракции крупностью менее 0,5 мм. Основная масса частиц золота претерпела техногенное воздействие. Частицы раскатаны в тонкие пластинки, контуры разорванные. Отмечаются продолговатые по форме зерна. По цвету золото ярко-желтое, соломенно-желтое. Единичные зерна в оксидных пленках. Поверхность частиц неровная, шероховатая.

В тяжелый шлик извлекается до 2,7% материала эфелей. В нем содержится 9,9% сильномагнитных минералов (магнетит, мартит), 66,1% слабомагнитных (ильменит, сидерит, гранат) и 24,0% немагнитных минералов (золото, касситерит, циркон, галенит и самородный свинец, сфен, рутил). Нерудные минералы представлены в основном кварцем, полевым шпатом и минералами глины, комплексом слюдисто-гидрослюдистых минералов.

В пробе золотосодержащей руды главными рудными минералами являются (в порядке убывания) арсенопирит, пирит и золото; сфалерит, медный колчедан, пирротин и галенит относят к минералам вторичной руды. Нерудные минералы – кварц, полевые шпаты, каолинит и другие

глинистые минералы, кальцит, другие карбонаты и углистое вещество.

Размер зерен золота от 0,001 до 0,3–0,5 мм; форма золотин чешуйчатая, пластинчатая.

При измельчении до крупности менее 0,1 мм рациональным анализом установлены следующие формы золота: свободное – 77,3%, в пленках гидроокислов – 8,1%, скрыто в сульфидах – 8,4%, тонко вкраплено в силикатах и сорбировано углистым веществом – 8,2%.

### **Результаты исследования и их обсуждение**

Для реализации проекта совместного освоения группы территориально сближенных золотосодержащих объектов, отличающихся запасами золота, разработана технологическая схема переработки малообъемных отходов россыпной золотодобычи.

С учетом обогатимости сырья и сведения к минимуму капитальных затрат, для извлечения золота из гале-эфельных отходов используют гравитационные методы обогащения, а в качестве основного аппарата для сепарации материала по плотности приняты винтовые сепараторы. В основной операции сепарации организовано струйное противоточное движение чернового концентрата и исходного питания. Винтовые сепараторы также установлены для контрольного извлечения золота из хвостов основной сепарации перед выводом их в отвал. Тяжелую фракцию винтовых сепараторов перечищают на концентрационных столах. Промпродукты из последующих операций обогащения возвращают в предыдущие.

С применением этой схемы (рис. 1) в промышленных условиях золотодобычи малым горным предприятием (ООО «НПП ГЕОС») при пилотных испытаниях промывочного комплекса ПГШОК-50-2 из 275,2 тыс. м<sup>3</sup> гале-эфельных отвалов извлекли 37,78 кг золота.

В качестве критерия оценки результатов опытно-промышленного освоения гале-эфельных отходов промывки россыпи золота прошлых лет выбран чистый дисконтированный доход (ЧДД/NPV). Величина ЧДД позволяет в динамике оценить доходность вложения средств инвестора в проект. Расчеты выполнены на основе данных, полученных в ходе опытно-промышленной практики извлечения золота из техногенных золотосодержащих ресурсов малым горным предприятием (табл. 1).

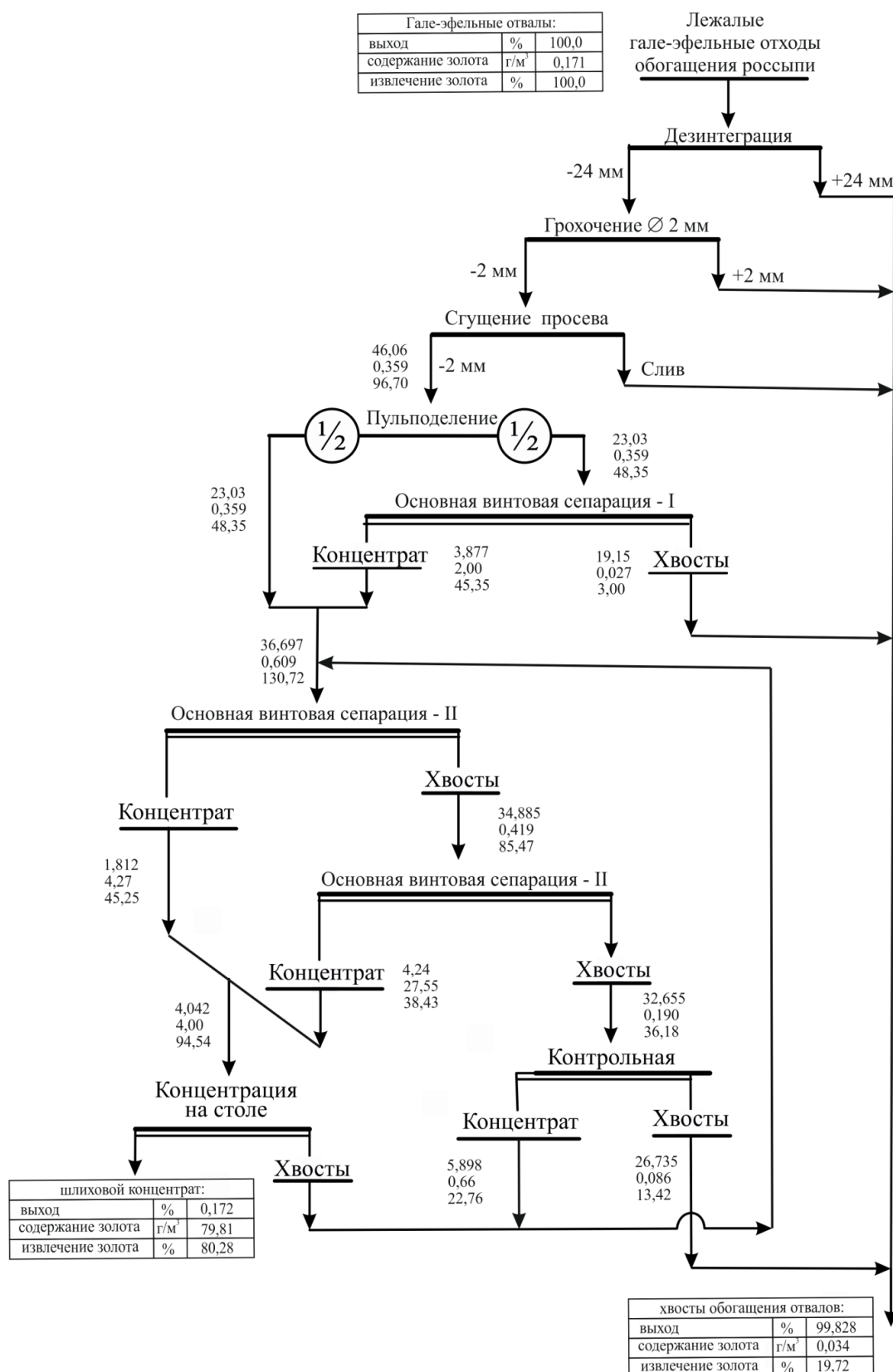


Рис. 1. Качественно-количественная схема опытно-промышленной переработки гале-эфельных отходов промывки россыпи золота

Fig. 1. An experimental and industrial processing flow sheet for boulders and dredging waste resulting from washing gold placer

Таблица 1. Результаты оценки денежных потоков при индивидуальном освоении гале-эфельных отвалов

Table 1. Cash flow evaluation in case of individual development of boulders and dredging waste

№ п/п	Наименование	Ед. изм.	Значение
1	Период оценки	лет	5
2	Годовая производительность промывки	тыс. м <sup>3</sup>	275,2
3	Содержание золота в отвалах	г/м <sup>3</sup>	0,171
4	Годовое производство золота	кг	37,78
5	Цена 1 г шлихового золота	руб.	2404,2
6	Стоимость золота	тыс. руб.	90830,7
7	Страховка-транспортировка и аффинаж	тыс. руб.	164,3
8	Чистая выручка от реализации	тыс. руб.	90666,4
9	Производственные затраты	тыс. руб.	44644,3
10	Общехозяйственные затраты	тыс. руб.	4562,9
11	Налоги (НДПИ/налог на имущество)	тыс. руб.	5449,8/2672,7
12	Операционные затраты	тыс. руб.	57329,7
13	Удельные операционные затраты:		
	на 1 м <sup>3</sup> гале-эфельных отвалов	руб./м <sup>3</sup>	208,3
	на 1 г золота	руб./г	1517,5
14	Производственные фонды	тыс. руб.	121485,4
15	Капитальные затраты	тыс. руб.	101237,8
16	Оборотные средства	тыс. руб.	20247,6
17	ЧДД/NPV (чистый дисконтированный доход (убыток) при ставке дисконта 20%)	тыс. руб.	-1053,8
18	PI (индекс рентабельности)	доли ед.	0,99
19	PP (срок окупаемости для дисконтированного денежного потока)	лет	не окупается

Из результатов экономического анализа освоения техногенных ресурсов следует вывод о том, что небольшое содержание золота в сырье (и, как следствие, небольшое количество производимой продукции – золота) не позволяет окупить вложенные средства в приемлемые для инвестора сроки.

Экономический результат будет иным, если объединить производственно-экономические активы малого горного предприятия, осуществляющего добычу золота из россыпей (прежде всего техногенных с небольшими запасами (ресурсами) золота), и горного (базового) предприятия, перерабатывающего руды золотосодержащего месторождения.

Корпоративное объединение (слияние и поглощение) золотодобывающих предприятий в единую иерархическую структуру (например,

холдинг) позволяет увеличить годовую мощность по производству золота. При этом покупается доля предприятия, а не его реальные активы. Интеграция в единую горизонтально-интегрированную компанию позволяет добывать золото с меньшими производственными и общехозяйственными издержками: удельные операционные затраты (на 1 г золота и на 1 т руды) снижаются на 20% при каждом удваивании производственной мощности предприятия. Эффект масштаба дополняется эффектами синергизма (от интеграции объектов науки, производства и инфраструктуры) и сокращения транзакционных издержек [21–24].

При объединении нескольких участков возможна их параллельная (одновременная) отработка меньшей численностью работающих, т.е. уменьшаются постоянные затраты в производственной себестоимости, но увеличиваются эксплуатационные транспортные затраты. Последние не являются критичными для проектов по освоению месторождений [25]. Возможность применения высокопроизводительного оборудования является основной причиной снижения себестоимости добычи золота при последовательном вовлечении в хозяйственный оборот участков с техногенными отходами, но увеличивается время отработки всех объектов в группе.

В лабораторных условиях исследована обогатимость золотосодержащих руд месторождения Павлик совместно со шлихом, выделенным из гале-эфельных отвалов. Руды месторождения Павлик перерабатывают на ЗИФ ИК «Арлан» по гравитационно-флотационной технологии.

Из пробы руды с применением гравитационных методов обогащения (винтовой сепаратор+концентрационный стол) в две стадии (на материале крупностью <0,5 и <0,16 мм) в гравео-концентрат, содержащий 101,22 г/т Au, выделено 63,41% Au при выходе гравеоконцентрата 1,754%. В том числе в «золотую головку» (38547 г/т Au) извлечено 41,3% Au при выходе продукта 0,003%. Установлено, что каждые 10 % золота, выделенные в цикле измельчение-классификация, приводят к снижению содержания золота в хвостах на 0,1 г/т (снижают общие потери золота с хвостами на 1%). Это оправдывает введение операции гравитации, несмотря на связанные с ней технологические (увеличение обводненности процесса) и экономические (повышение операционной себестоимости) издержки.

Хвосты гравитации (крупностью 80% класса – 71 мкм) смешивали со шлихами, выделенными из гале-эфельных отвалов, и подвергали флотации (с контрольной флотацией хвостов), концен-

трат которой дважды перечисляли. В операции основной флотации использовали струйное противоточное движение черного концентрата и исходного питания. Во II струе флотации в течение первых 3 минут без подачи флотореагентов (с использованием флотореагентов, связанных с твердой и жидкой фазами черного концентрата I струи флотации) выделяли быстро флотируемую часть концентрата, и только затем вводили новые порции флотореагентов. Причем быстро флотируемую фракцию черного концентрата выделяли с использованием в качестве газовой фазы смеси воздуха с горячим насыщенным водяным паром. Промпродукты (хвосты I перекисточки и пенный продукт контрольной операции флотации) перед заворотом в операцию I перекисточки перефлотировали.

После активации сульфидов медным купоросом (двумя загрузками по 50 г/т) золото извлекали в содовой среде (~500 г/т) при pH 8,5–8,7 бутиловым ксантогенатом калия (из расчета 150 г/т в основную и 100 г/т в контрольную операции флотации) при создании пены с помощью Т-92 (в два приема по 80 и 40 г/т). В операцию I перекисточки подавали бутиловый ксантогенат калия (из расчета 2 г/т); промпродуктовую флотацию вели без подачи флотореагентов. Для подавления эффекта *preg-robbling* в операцию основной флотации подавали крахмал (500 г/т); с этой же целью в дальнейшем сорбционное цианирование флотоконцентрата осуществляли в присутствии керосина (700 г/т). Флотацию вели до прекращения какой-либо минерализации пены сульфидами и начала механического выноса минералов пустой породы. Общее время флотации составляло 25 минут, из которых 10 минут отводили на основную операцию флотации и остальное – на контрольную; промпродукты перекисточки в течение 9 минут. Время доводки черного концентрата составляло 7 минут.

В опытах, моделирующих замкнутый цикл флотации, извлечение золота в концентрат, содержащий 63,62 г/т Au, извлечено 92,63% металла (с учетом золота, выделенного в гравико-концентрат). Содержание Au стабилизировалось в хвостах операции контрольной флотации навески обогащаемого материала. Содержание Au в продуктах обогащения определяли пробирным методом с атомно-абсорбционным окончанием анализа на базе спектрометра AA-7000 Shimadzu, в некоторых случаях – с ICP-окончанием. Качественно-количественная схема

обогащения шихты, составленной из продукта обогащения отходов россыпной золотодобычи (тяжелого шлиха) и руд коренного месторождения золота, приведена на **рис. 2**.

Предусматривается металлургическая доработка гравико- и флотоконцентратов до слитков лигатурного золота аффинажной готовности (ТУ 117-2-7-75).

«Золотую головку» (с крупным золотом) перерабатывают на сплав методом пирометаллургии [26]. Сульфиды и сульфидарсениды железа (в виде пирита и арсенопирита) разлагают окислительным обжигом, огарок от которого плавят (без коллектора с флюсами) на золотосеребряный сплав (металл Доре) и шлак железонатриевый.

Гравитационный концентрат подвергают интенсивному выщелачиванию крепким цианистым раствором, обеспечивающему за приемлемое время высокое извлечение золота из упорного сырья. В промышленных условиях это может быть Gekko (или ConSepAcacia)-процесс переработки гравикоконцентратов в ILR-реакторе [27].

Из флотоконцентрата золото извлекают сорбционным цианированием (с использованием RIP- или CIP-технологии).

Общие потери золота при металлургической обработке гравико- и флотоконцентратов составляют 11,37%, но экономическая целесообразность получения товарной продукции в виде лигатурного золота очевидна. Представительность пробы, отбираемой при опробовании компактного слитка и направляемой на химический анализ, существенно увеличивается (по сравнению с опробованием большого объема и массы шихтового золота). При таком завершении технологического процесса точность определения количества золота, сдаваемого на аффинаж, высокая, а отрицательная аффинажная разница при окончательном расчете между аффинажным заводом и поставщиком – минимальная. На 5–7% сокращаются затраты, связанные со страховкой и транспортировкой драгметалла.

На аффинажном заводе цена переработки концентрата, содержащего 1–2% Au, равна 4,4% от стоимости химически чистого золота в нем при извлечении 85% Au. При той же цене за аффинаж 2–10%-го концентрата извлечение золота из него составляет уже 95%. Следовательно, при сдаче на аффинаж бедных концентратов поставщик теряет до 20% химически чистого золота.

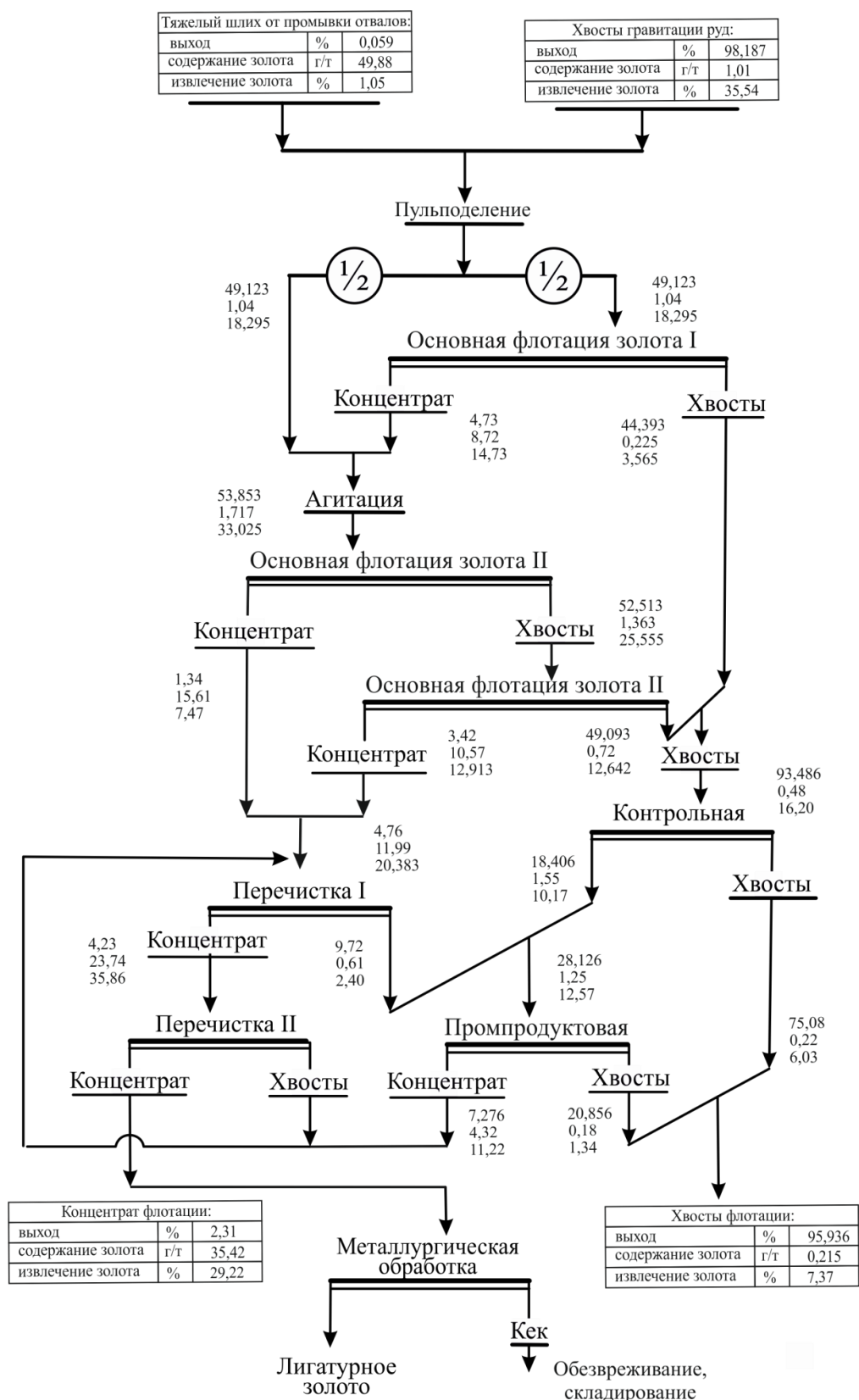


Рис. 2. Качественно-количественная схема совместного обогащения руд и россыпей золота, составленная по результатам опыта, моделирующего замкнутый цикл флотации  
 Fig. 2. A joint processing flow sheet for ores and placers of gold prepared by the experience simulating a closed flotation circuit



С использованием результатов лабораторных исследований по извлечению рудного и россыпного золота из искусственно составленной шихты подготовлены исходные данные для моделирования денежных потоков при реализации проекта по совместной переработке руд и россыпей золота в условиях промышленного производства (табл. 2).

Таблица 2. Результаты балансового опыта по совместной переработке руд и россыпей золота  
Table 2. Balance sheet for the joint processing of ores and placers of gold

№ п/п	Наименование показателя	Значение показателя
1	Массовая доля золота в шихте из руд и шлихов, г/т	2,80
2	Выход концентрата, %, в том числе:	4,064
	- «золотая головка»	0,003
	- гравитационный концентрат	1,754
	- флотационный концентрат	2,31
3	Массовая доля золота в продуктах обогащения, г/т:	
	- «золотая головка»	38547
	- гравитационный концентрат	35,36
	- флотационный концентрат	35,42
4	Извлечение золота в продукты обогащения, %, в том числе:	92,63
	- «золотая головка»	41,30
	- гравитационный концентрат	22,11
	- флотационный концентрат	29,22
5	Потери золота, %, в том числе:	19,06
	- обогащение песков россыпи, %:	0,32
	- обогащение шихты из руд и шлихов	7,37
	- металлургическая обработка концентратов, %	11,37
6	Зачетное извлечение в сплав лигатурного золота, %	81,26

При смешении руд ( $\alpha = 2,77$  г/т Au) и тяжелого шлиха ( $\alpha = 49,88$  г/т Au), выделенного из отходов россыпной золотодобычи, содержание золота в шихте составило  $\alpha = 2,80$  г/т.

Средневзвешенное содержание золота  $\alpha_{\Sigma}$ , г/т, в суммарных запасах группы месторождений  $M_{\Sigma}$  рассчитывают с учетом содержания золота  $\alpha_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) и количества запасов в отдельных месторождениях группы  $M_i$  т:

$$\alpha_{\Sigma} = \frac{M_1 \alpha_1 + M_2 \alpha_2 + \dots + M_n \alpha_n}{M_1 + M_2 + \dots + M_n}. \quad (1)$$

Для повышения эффективности извлечения ценного компонента смешиваемые материалы должны быть тождественны не столько по со-

держанию извлекаемого компонента, сколько по их способности к разделению по тому или иному физическому свойству. Разная обогатимость смешиваемых материалов при одинаковом содержании в них ценного компонента приводит к «разубоживанию» материала с высокой способностью к разделению материалом менее контрастным по физическому свойству, по которому ведут разделение.

Объект с запасами (ресурсами)  $M$  и содержанием ценного компонента  $\alpha$  следует включать в группу для совместного освоения, если после объединения запасов выполняется соотношение.

$$\frac{M_{\Sigma} \alpha_{\Sigma}}{M \alpha} \geq \frac{Y_{\Sigma}}{Y}, \quad (2)$$

где  $Y$  – критерий, характеризующий эффективность освоения запасов базового месторождения.

$$Y = \left[ \frac{Q(C_1 + C_2 + C_3)}{\gamma} + C_{T1} + \right. \\ \left. + C_{T2} + \Sigma C + C_M(\beta) \right] \varepsilon_M(\beta), \quad (3)$$

где  $M$  – наиболее качественные запасы (базовые) месторождения с содержанием извлекаемого металла  $\alpha$ ;  $Q$  – переработка руд;  $C_1, C_2, C_3$  – соответственно себестоимость добычи, усреднения и обогащения 1 т руды;  $\gamma$  – выход концентрата;  $C_{T1}, C_{T2}$  – стоимость транспортировки 1 т руды до ЗИФ и 1 т концентрата до транспортного узла;  $C_M(\beta)$  – себестоимость металлургической переработки 1 т концентрата в зависимости от содержания  $\beta$  в нем ценного компонента;  $\Sigma C$  – прочие затраты в расчете на 1 т руды;  $\varepsilon_M(\beta)$  – извлечение ценного компонента в металлургическом переделе в зависимости от качества концентрата. При моделировании денежных потоков в качестве базового принята обогатимость руд месторождения Павлик.

Рентабельность  $R$  определяется содержанием ценного компонента в перерабатываемом сырье  $\alpha_{\Sigma}$ , эксплуатационными транспортными расходами  $S$  и извлечением ценного компонента в товарный продукт  $\varepsilon_{\Sigma}$ :

$$R(\alpha_{\Sigma}, S, \varepsilon_{\Sigma}) = f \left[ (C \cdot \alpha_{\Sigma} \cdot \varepsilon_{\Sigma}) \cdot (3 + S)^{-1} \right]; \quad (4)$$

$$\varepsilon_{\Sigma}(\alpha_{\Sigma}, R, S) = f \left[ R \cdot (C \cdot \alpha_{\Sigma})^{-1} \cdot (3 + S) \right]; \quad (5)$$

$$\alpha_{\Sigma}(\varepsilon_{\Sigma}, R, S) = f \left[ R \cdot (C \cdot \varepsilon_{\Sigma})^{-1} \cdot (3 + S) \right], \quad (6)$$

где  $3$  – затраты на добычу и обогащение сырья при его цене  $C$ .

С использованием взаимосвязанных соотношений (4)–(6) для каждого объекта рассчитывают максимальную дальность перевозки сырья по направлению к базовому объекту, которая ограничивается приемлемыми для недропользователя транспортными затратами (принятой рентабельностью). На пересечении транспортных путей (в «центре тяжести» группы) размещают обогатительную фабрику [28, 29].

Результаты оценки экономической эффективности освоения малообъемных (в том числе техногенных) месторождений россыпного золота при их совместной переработке с рудами коренного месторождения по величине дисконтированных денежных потоков NPV и внутренней нормы доходности IRR [30] приведены в **табл. 3**.

Таблица 3. Результаты моделирования денежных потоков при совместном освоении руд и россыпей золота  
Table 3. Simulation of cash flows resulting from the joint development of ores and placers of gold

№ п/п	Наименование	Ед.изм.	Значение
1	Период оценки	год	2019-2023
2	Суммарный объем переработки	тыс. т	15004
3	Суммарное производство золота	кг	33952
4	Чистая выручка от реализации	млн руб.	98199
5	Операционные затраты, в том числе:	млн руб.	46646
	- горные работы	млн руб.	17464
	- промывка эфелей и обогащение шлихов и руд	млн руб.	18281
	- общехозяйственные затраты	млн руб.	3713
6	ЧДД/NPV (чистый дисконтированный доход при ставке дисконта 20 %)	млн руб.	8549
7	PI (индекс рентабельности дисконтированных инвестиций (доход на вложенный капитал))	доли ед.	1,85
8	DPP (дисконтированный срок возврата инвестиций)	лет	2,1
9	Налоги (НДПИ/налог на имущество)	млн руб.	5900/1288
10	Оборотный капитал	млн руб.	81
11	EBIT/ EBITDA	млн руб.	76240/98199
12	Рентабельность EBITDA	%	79,4
13	IRR (внутренняя норма доходности)	%	54,85

Из результатов выполненной технико-экономической оценки (**см. табл. 3**) следует вывод о целесообразности объединения запасов

россыпей и руд с целью совместного освоения. При переходе от индивидуального освоения отходов россыпной золотодобычи к их переработке на стационарной фабрике в составе шихты с обогащаемой на ней руды общий экономический эффект становится существенно положительным. Суммарные запасы золота группы обеспечивают окупаемость инвестиций в приемлемые для инвестора сроки, внутренняя норма доходности от капвложений превышает уровень доходности от покупки ценных бумаг, размещения средств на депозите в банке.

### Заключение

Из результатов опытно-промышленной практики извлечения золота из отходов промывки песков россыпи прошлых лет следует, что возможно высокое извлечение золота. По результатам промывочного сезона составлена калькуляция затрат, связанных с добычей золота из техногенных отходов малым горным предприятием. Даже с применением современной техники (с высокой удельной производительностью) и технологии извлечения золота (схем обогащения, движение разделяемых потоков в которых приводит к формированию материала с высоким уровнем обогатимости – способностью к разделению) и рациональной организацией труда чистый дисконтированный доход оказывается отрицательным. Затраты инвестора не окупаются за счет небольшой извлекаемой ценности отходов (стоимости золота, добываемого в сезон).

Удельные капитальные вложения и эксплуатационные затраты могут быть снижены за счет увеличения производственной мощности предприятия. Например, путем совместной переработки золотосодержащих руд и техногенных отходов россыпной золотодобычи, рассматривая их минерально-сырьевые базы как запасы единого месторождения, отрабатываемые предприятиями холдинга.

В лабораторных условиях подтверждена высокая технологическая эффективность извлечения золота флотацией из искусственной шихты, составленной из тяжелого шлиха, выделенного из гале-эфельных отвалов гравитационными методами обогащения, и руд коренного месторождения золота. Результаты лабораторных исследований использованы при моделировании денежных потоков при совместной переработке этих георесурсов. Критериями оценки технологии выбраны чистый денежный доход и внутренняя норма доходности. Значения экономических критериев позволяют рассматривать совместную переработку руд и россыпей золота с применением разработанных технологических решений как экономически эффективный инновационный проект.

## Список литературы

1. Значение комплексного потенциала техногенных россыпных месторождений регионов Дальнего Востока России и новый стратегический подход к их освоению / Литвинцев В.С., Алексеев В.С., Васянович Ю.А., Краденых И.А. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. №30. С.78–86.
2. Ресурсный потенциал техногенных золотороссыпных месторождений и стратегия их масштабного освоения / Литвинцев В.С., Алексеев В.С., Краденых И.А., Усиков В.И. // Маркшердерия и недропользование. 2017. №5. С.21–29.
3. Чантурия В.А. Перспективы устойчивого развития горноперерабатывающей индустрии России // Горный журнал. 2007. №2. С. 2–9.
4. Михайлов Б.К., Беневольский Б.И., Вартанян С.С. Минеральные ресурсы России // Экономика и управление. 2006. №3. С. 40–45.
5. Ван-Ван-Е А.П. Ресурсная база природно-техногенных золотороссыпных месторождений. М.: Горная книга, 2010. 268 с.
6. Мамаев Ю.А., Литвинцев В.С., Пономарчук Г.П. Техногенные россыпи благородных металлов Дальневосточного региона России и их рациональное освоение. М.: Горная книга, 2010. 309 с.
7. Макаров В.А. Золото техногенных минеральных объектов – ресурсы и проблемы геолого-технологической оценки // Золото и технологии. 2011. №3(13). С.25–28.
8. Евдокимов С.И., Герасименко Т.Е., Дмитрак Ю.В. Ликвидация накопленного экологического ущерба // Устойчивое развитие горных территорий. 2019. Т. 11. №2. С. 238–248.
9. Евдокимов С.И., Дмитрак Ю.В., Герасименко Т.Е. Утилизация лежалого клинкера ОАО «Электроцинк» // Устойчивое развитие горных территорий. 2020. Т.12. №2(44). С. 291–301.
10. Организационный механизм и технология освоения отходов россыпной золотодобычи / Евдокимов С.И., Герасименко Т.Е., Дмитрак Ю.В., Байматов К.К. // Устойчивое развитие горных территорий. 2020. Т.12. №1(43). С. 116–128.
11. Мирзеханов Г.С., Литвинцев В.С., Алексеев В.С. Перспективы масштабного освоения техногенных россыпных месторождений благородных металлов // Маркшейдерия и недропользование. 2019. №6. С. 22–30.
12. Литвинцев В.С. Основные направления стратегии освоения техногенных рудных и россыпных месторождений благородных металлов // Горный журнал. 2013. №10. С. 38–41.
13. Краденых И.А., Литвинцев В.С. Роль менеджмента в экономической деятельности золотодобывающих предприятий // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018. №10. С. 200–206.
14. Мирзеханов Г.С., Литвинцев В.С. Состояние и проблемы освоения техногенных россыпных месторождений благородных металлов в Дальневосточном регионе // Горный журнал. 2018. №10. С. 25–30.
15. Литвинцев В.С. О ресурсном потенциале техногенных золотороссыпных месторождений // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. №1. С. 118–126.
16. Повышение экономической эффективности горнодобывающих предприятий за счет вовлечения в эксплуатацию техногенных георесурсов / Гавришев С.Е., Корнилов С.Н., Пыталев И.А., Гапонова И.В. // Горный журнал. 2017. №12. С. 46–51.
17. Сергеев И.Б., Пономаренко Т.В. Формирование и оценка синергетических эффектов при интеграции горных компаний // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013. №7. С. 316–323.
18. Ижевский В.Л., Кононов В.Н. Стратегические аспекты управления консолидированными процессами групп компаний // Экономический анализ: теория и практика. 2017. Т.16. Вып.6. С. 1061–1081.
19. Краденых И.А., Барчуков А.В. Формирование синергетических эффектов при горизонтальной интеграции золотодобывающих предприятий // Менеджмент в России и за рубежом. 2016. №5. С. 81–88.
20. Краденых И.А. Оценка экономической эффективности золотодобывающих предприятий с учетом влияющих факторов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. №24. С. 390–401.
21. Sampson T. Dynamic selection: an idea flows theory of entry, trade, and growth // The Quarterly Journal of Economics. 2016. Vol.131. No.1. P. 315–380.
22. Arcolakis C.A unified theory of firm selection and growth // The Quarterly Journal of Economics. 2016. Vol.131. No.1. P. 89–156.
23. Шваб К. Четвертая промышленная революция. М.: Эксмо, 2018. 288 с.
24. Романова О.А. Инновационная парадигма новой индустриализации в условиях формирования интегрального мирохозяйственного уклада // Экономика региона. 2017. Т.13. Вып.1. С. 276–289.
25. Самсонов Н.Ю., Ягольницер М.А. Групповая разработка малых золоторудных месторождений. Новосибирск: ИЭОПП СО РАН, 2012. 240 с.

26. Плавка гравитационных концентратов на внутренний коллектор / Лобанов В.Г., Агеев Н.Г., Меньщиков В.А., Набиуллин Ф.М., Начаров В.Б. // Изв. вузов. Цветная металлургия. Спецвыпуск. 2015. С. 35–39.
27. Пелих В.В., Салов В.М. Исследование переработки гравитационных концентратов на модуле интенсивного цианирования «Акация» // Вестник ИргТУ. 2013. №7(78). С. 41–47.
28. Исследование возможности отработки техногенных отвалов россыпной золотодобычи методами «рудной» технологии / Александрова Т.Н., Александров А.В., Литвинова Н.М., Богомяков Р.В. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013. № 3. С. 65–70.
29. Литвинцев В.С., Алексеев В.С., Алексеева Е.В. Программный комплекс оптимального расположения обогатительной фабрики при отработке сближенных россыпных месторождений полезных ископаемых // Маркшейдерия и недропользование. 2019. №4. С. 47–51.
30. Зайцев А.Ю. Оценка стоимости золоторудных месторождений // Записки Горного института. 2018. Т. 233. С. 547–553.

## References

1. Litvintsev V.S., Alekseev V.S., Vasyanovich Yu.A., Kradenykh I.A. The value of the integrated potential of technogenic alluvial deposits in the regions of the Russian Far East and a new strategic approach to their development. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)], 2019, no. 30, pp. 78–86. (In Russ.)
2. Litvintsev V.S., Alekseev V.S., Kradenykh I.A., Usikov V.I. Resource potential of technology-related gold placer deposits and the strategy of their large-scale development. *Marksheideriya i nedropolzovanie* [Mine Surveying and Subsoil Resources Management], 2017, no. 5, pp. 21–29. (In Russ.)
3. Chanturiya V.A. Prospects for sustainable development of the mining and processing industry in Russia. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2007, no. 2, pp. 2–9. (In Russ.)
4. Mikhailov B.K., Benevol'skiy B.I., Vartanyan S.S. Mineral resources of Russia. *Ekonomika i upravlenie* [Economics and Management], 2006, no.3, pp. 40–45. (In Russ.)
5. Van-Van-E A.P. *Resursnaya baza prirodno-tekhnogennykh zolotorossypnykh mestorozhdeniy* [Resource base of natural and technology-related gold placer deposits]. Moscow: Mining Books, 2010, 268 p. (In Russ.)
6. Mamaev Yu.A., Litvintsev V.S., Ponomarchuk G.P. *Tekhnogennye rossypi blagorodnykh metallov Dalnevostochnogo regiona Rossii i ikh ratsionalnoe osvoenie* [Technogenic placers of noble metals in the Far East region of Russia and their rational development]. Moscow: Mining Books, 2010, 309 p. (In Russ.)
7. Makarov V.A. Gold of technology-related mineral facilities: resources and difficulties of the geological and technological assessment. *Zoloto i tekhnologii* [Gold and Technologies], 2011, no. 3(13), pp. 25–28. (In Russ.)
8. Evdokimov S.I., Gerasimenko T.E., Dmitrak Yu.V. Elimination of accumulated environmental damage. *Ustoychivoe razvitie gornykh territoriy* [Sustainable Development of Mountain Territories], 2019, vol.11, no. 2, pp. 238–248. (In Russ.)
9. Evdokimov S.I., Dmitrak Yu.V., Gerasimenko T.E. Utilization of aged clinker of OJSC Electro Zinc. *Ustoychivoe razvitie gornykh territoriy* [Sustainable Development of Mountain Territories], 2020, vol.12, no. 2(44), pp. 291–301. (In Russ.)
10. Evdokimov S.I., Gerasimenko T.E., Dmitrak Yu.V., Baimatov K.K. The organizational mechanism and technology for the development of alluvial gold mining waste. *Ustoychivoe razvitie gornykh territoriy* [Sustainable Development of Mountain Territories], 2020, vol.12, no. 1(43), pp. 116–128. (In Russ.)
11. Mirzekhanov G.S., Litvintsev V.S., Alekseev V.S. Prospects for large-scale development of technology-related alluvial deposits of noble metals. *Marksheideriya i nedropolzovanie* [Mine Surveying and Subsoil Resources Management], 2019, no. 6, pp. 22–30. (In Russ.)
12. Litvintsev V.S. The main directions of the strategy for the development of technology-related ore and placer deposits of noble metals. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2013, no. 10, pp. 38–41. (In Russ.)
13. Kradenykh I.A., Litvintsev V.S. The role of management in the economic activity of gold mining enterprises. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)], 2018, no. 1, pp. 200–206. (In Russ.)
14. Mirzekhanov G.S., Litvintsev V.S. State and difficulties of development of technology-related placer deposits of noble metals in the Far East region. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2018, no. 10, pp. 25–30. (In Russ.)
15. Litvintsev V.S. Resource potential of placers spoil dumps. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh* [Journal of Mining Sciences], 2013, no.1, pp. 118–126. (In Russ.)
16. Gavrishev S.E., Kornilov S.N., Pytalev I.A., Gaponova I.V. Increasing the economic efficiency of mining enterprises by involving technology-related georesources in operation. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2017, no. 12, pp. 46–51. (In Russ.)
17. Sergeev I.B., Ponomarenko T.V. Formation and assessment of synergistic effects in the integration of mining companies. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)], 2013, no. 7, pp. 316–323. (In Russ.)
18. Izhevskiy V.L., Kononov V.N. Strategic aspects of managing the consolidated processes of groups of companies. *Ekonomicheskii analiz: teoriya i praktika* [Economic Analysis: Theory and Practice], 2017, vol. 16, no. 6, pp. 1061–1081. (In Russ.)
19. Kradenykh I.A., Barchukov A.V. Formation of synergistic effects in the horizontal integration of gold mining enterprises. *Menedzhment v Rossii i za rubezhom* [Management in Russia and Abroad], 2016, no. 5, pp. 81–88. (In Russ.)



20. Kradenykh I.A. Assessment of the economic efficiency of gold mining enterprises taking into account the influencing factors. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)], 2017, no. 24, pp. 390–401. (In Russ.)
21. Sampson T. Dynamic selection: an idea flows theory of entry, trade, and growth. *The Quarterly Journal of Economics*. 2016, vol. 131, no. 1, pp. 315–380.
22. Arcolakis C. A unified theory of firm selection and growth. *The Quarterly Journal of Economics*. 2016, vol. 131, no. 1, pp. 89–156.
23. Schwab K. *Chetvertaya promyshlennaya revolyutsiya* [The Fourth Industrial Revolution]. Moscow: Eksmo, 2018, 288 p. (In Russ.)
24. Romanova O.A. The innovation paradigm of new industrialization in the context of the formation of an integral world economic order. *Ekonomika regiona* [Economy of Region], 2017, vol. 13, no. 1, pp. 276–289. (In Russ.)
25. Samsonov N.Yu., Yagolnitsker M.A. *Gruppovaya razrabotka malykh zolotorudnykh mestorozhdeniy* [Group development of small gold ore deposits]. Novosibirsk: IEIE SB RAN, 2012, 240 p. (In Russ.)
26. Lobanov V.G., Ageev N.G., Menshchikov V.A., Nabiullin F.M., Nacharov V.B. Smelting of gravitational concentrates on the internal collector. *Izv. Vuzov. Tsvetnaya metallurgiya. Spetsvypusk*. [Universities' Proceedings. Non-ferrous Metallurgy. Special issue], 2015, pp. 35–39. (In Russ.)
27. Pelikh V.V., Salov V.M. Study on the processing of gravity concentrates on the Acacia intensive cyanidation module. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2013, no. 7(78), pp. 41–47. (In Russ.)
28. Aleksandrova T.N., Aleksandrov A.V., Litvinova N.M., Bogomyakov R.V. Study on the development of technology-related waste dump of alluvial gold mining using the methods of “ore” technology. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)], 2013, no. 3, pp. 65–70. (In Russ.)
29. Litvinsev V.S., Alekseev V.S., Alekseeva E.V. Software complex for the optimal location of the concentration plant during the development of adjacent placer deposits of minerals. *Marksheideriya i nedropolzovanie* [Mine Surveying and Subsoil Resources Management], 2019, no. 4, pp. 47–51. (In Russ.)
30. Zaitsev A.Yu. Estimated value of gold deposits. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of the Mining Institute], 2018, vol. 233, pp. 547–553. (In Russ.)

Поступила 07.10.2020; принята к публикации 12.11.2020; опубликована 25.12.2020  
Submitted 07/10/2020; revised 12/11/2020; published 25/12/2020

**Троценко Игорь Герасимович** – кандидат технических наук, доцент,  
Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет),  
Владикавказ, Россия. Email: itrocenko@mail.ru

**Герасименко Татьяна Евгеньевна** – кандидат технических наук,  
начальник отдела интеллектуальной собственности  
Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет),  
Владикавказ, Россия. Email: gerasimenko\_74@mail.ru

**Евдокимов Сергей Иванович** – кандидат технических наук, доцент,  
Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет),  
Владикавказ, Россия. Email: eva-ser@mail.ru

**Igor G. Trotsenko** – PhD (Eng.), Associate Professor  
North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technical University), Vladikavkaz, Russia.  
Email: itrocenko@mail.ru

**Tatiana E. Gerasimenko** – PhD (Eng.), Head of the Intellectual Property Office  
North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technical University), Vladikavkaz, Russia.  
Email: gerasimenko\_74@mail.ru

**Sergey I. Evdokimov** – PhD (Eng.), Associate Professor  
North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technical University), Vladikavkaz, Russia.  
Email: eva-ser@mail.ru



# ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ METAL FORMING

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.771

DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-4-24-31



## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРЫ МЕТАЛЛА НА СТАНЕ ГОРЯЧЕЙ ЛИСТОВОЙ ПРОКАТКИ

Соседкова М.А., Григоренко А.С., Радионова Л.В.

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

**Аннотация.** Важнейшей задачей при разработке технологий процесса листовой горячей прокатки является определение температуры полосы в технологической линии стана. В настоящей работе разработана математическая модель для расчета температурных режимов прокатки полосы на стане горячей прокатки 2300/1700 ПАО «Челябинский металлургический комбинат». Математическая модель учитывает потери температуры металла в процессе прокатки и транспортировке по линии стана, разогрев полосы в процессе деформации, подогрев заготовки в промежуточной подогривательной печи, падение температуры проката при прохождении охлаждающих устройств. Изменение температуры определяется и фиксируется по всей линии стана, т.е. от нагревательных методических печей до моталок горячей смотки полосы. Проверка адекватности разработанной математической модели путем сравнения расчетных и экспериментальных данных показала сходимость, достаточную для проведения расчетов при анализе и совершенствовании применяемых режимов прокатки и разработке новых. В статье приведен пример использования разработанной математической модели для расчета температурных параметров проката. Математическая модель может быть использована как для научных исследований, так и в качестве инструмента для инженерных расчетов температурных режимов прокатки листа.

**Ключевые слова:** температурные режимы, листовая горячая прокатка, математическая модель, прокатный стан 2300/1700.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках субсидии на финансовое обеспечение выполнения государственного задания (фундаментальное научное исследование), договор № FENU-2020-0020 (2020071ГЗ).*

© Соседкова М.А., Григоренко А.С., Радионова Л.В., 2020

### Для цитирования

Соседкова М.А., Григоренко А.С., Радионова Л.В. Математическая модель расчета температуры металла на стане горячей листовой прокатки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №4. С. 24–31. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-4-24-31>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

## MATHEMATICAL MODELING OF STEEL TEMPERATURE ON A HOT SHEET ROLLING MILL

Sosedkova M.A., Grigorenko A.S., Radionova L.V.

South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia

**Abstract.** The most important objective of developing technologies for the process of hot sheet rolling is to determine the strip temperature in the technological line of the mill. In this paper, a mathematical model has been developed for calculating the temperature schedules of strip rolling on hot rolling mill 2300/1700 of PJSC Chelyabinsk Metallurgical Plant. The mathematical model takes into account the steel temperature loss during rolling and transportation along the mill line, heating of the strip during its deformation, heating of the billet in an intermediate reheating furnace, and a drop in the temperature of the rolled products, when passing through cooling facilities. Temperature changes are detected and recorded along the mill line, from reheating continuous furnaces to hot strip coilers. Checking the developed mathematical model adequacy by comparing the calculated and experimental data has shown convergence sufficient to carry out calculations in the analysis and improvement of the applied rolling schedules and development of new ones. The paper provides an example of using the developed mathematical model to calculate the temperature parameters of rolled products. The mathematical model can be used both for scientific research and as a tool for engineering calculations of sheet rolling temperature schedules.

**Keywords:** temperature conditions, sheet hot rolling, mathematical model, rolling mill 2300/1700.

*The research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of a grant for performance of the state order (basic research) under Agreement No. FENU-2020-0020 (2020071GZ).*

### For citation

Sosedkova M.A., Grigorenko A.S., Radionova L.V. Mathematical Modeling of Steel Temperature on a Hot Sheet Rolling Mill. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020, vol. 18, no. 4, pp. 24–31. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-4-24-31>

Математическое моделирование является наиболее перспективным направлением в процессах создания новых и совершенствования существующих технологий производства прокатной продукции. Моделирование температурных процессов, происходящих в прокатываемом металле в технологической цепочке, наиболее важны для обеспечения высокого качества, требуемой структуры и свойств готового проката [1–8]. Методы расчета температурных режимов горячей прокатки предложены в различных научных работах [9–15]. Анализ показал наличие моделей, основанных на кибернетическом подходе к их построению, т.е. на статистической обработке результатов эксперимента, или на гносеологическом подходе, т.е. на теоретических зависимостях процессов теплопередачи. Известные модели, как правило, достаточно сложны для использования в инженерных расчетах, а также в системах автоматического управления.

Различаются модели и по степени учета составляющих температурного баланса. Значительная часть методов основывается на учете потерь тепла только излучением и имеет в своей структуре эмпирические коэффициенты, которые учитывают влияние других составляющих. Существуют методы, учитывающие уменьшение температуры за счет излучения и ее повышение в результате пластической деформации металла. Также ряд методов учитывает теплопередачу между полосой и рабочим инструментом, а также за счет конвективного теплообмена движущейся полосы и воздуха.

Целью настоящей работы является разработка математической модели изменения температуры металла в процессе горячей листовой прокатки в условиях стана 2300/1700.

Схема расположения оборудования стана горячей прокатки 2300/1700 представлена на **рис. 1**.

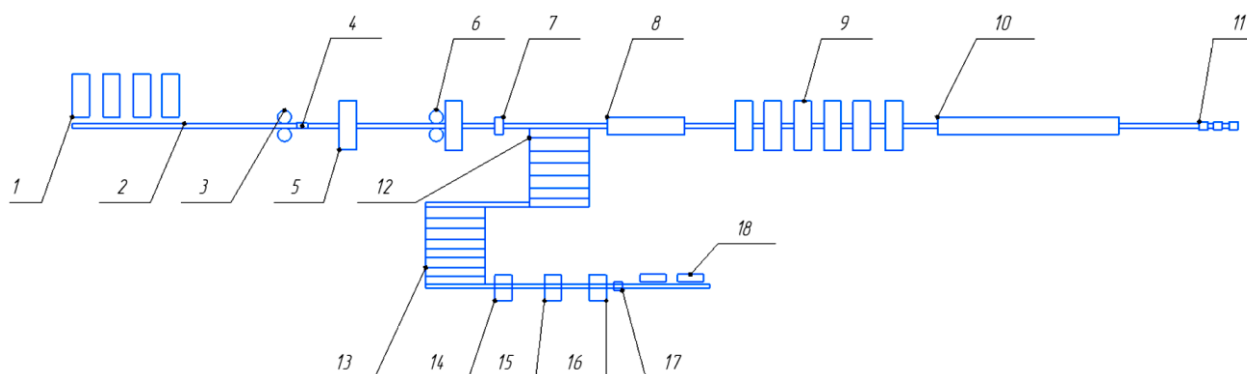


Рис. 1. Схема стана горячей листовой прокатки 2300/1700: 1 – методические толкательные печи; 2 – рольганг; 3 – черновой окалиноломатель; 4 – гидросбив окалины; 5 – уширительная клеть стана 2300; 6 – универсальная клеть стана 2300; 7 – гильотинные ножницы горячей резки; 8 – проходная роликовая печь; 9 – непрерывный стан 1700; 10 – установка ламинарного охлаждения; 11 – моталки горячей смотки полосы; 12 – холодильник; 13 – инспекторский стол; 14 – листопрямляющая машина; 15 – дисковые ножницы; 16 – гильотинные ножницы холодной резки; 17 – клеймитель; 18 – листоукладчик с карманами

Fig. 1. Hot rolling mill 2300/1700: 1 is continuous pusher furnaces; 2 is a roller conveyor; 3 is a rough scale breaker; 4 is a descaler; 5 is a spreading stand of mill 2300; 6 is a universal stand of mill 2300; 7 is hot cutting guillotine shears; 8 is a continuous roller furnace; 9 is continuous mill 1700; 10 is a laminar cooling unit; 11 is hot strip coilers; 12 is a cooling bed; 13 is an inspection table; 14 is a sheet straightening machine; 15 is circular shears; 16 is cold cutting guillotine shears; 17 is a marking machine; 18 is a stacker with pockets

Общая постановка задачи, приведенная в литературе [16] с адаптацией к процессу горячей листовой прокатки, выглядит следующим образом:

$$t_i = t_{i-1} - \sum_{j=1}^{n_1} \Delta t_{п_j} + \sum_{k=1}^{n_2} \Delta t_{п_k} + \sum_{l=1}^{n_3} \Delta t_{н_l} - \sum_{z=1}^{n_4} \Delta t_{ох_z}, \quad (1)$$

где  $\Delta t_{п_i}$  – потери температуры в процессе прокатки и транспортировки в линии стана;  $\Delta t_{п_k}$  – разогрев полосы в процессе его деформации;  $\Delta t_{н_l}$  – повышение температуры в подогревающих устройствах технологического потока стана;  $\Delta t_{ох_z}$  – понижение температуры металла в охлаждающих устройствах стана;  $i = \overline{1, n}$  – факторы, влияющие на изменение температуры раската;  $j = \overline{1, n_1}$  – факторы, способствующие охлаждению металла в процессе прокатки и транспортировки его в линии стана;  $k = \overline{1, n_2}$  – факторы, вызывающие разогрев раската в процессе пластической деформации;  $l = \overline{1, n_3}$  – подогревающие устройства в линии прокатного стана;  $z = \overline{1, n_4}$  – охлаждающие установки в линии прокатного стана.

Проанализировав факторы, влияющие на температуру металла в процессе прокатки и транспортировки его в линии стана, получим формулу для расчета изменения температуры металла в  $i$ -й точке технологического процесса [17]:

$$t_i = t_{i-1} - \Delta t_{из} - \Delta t_{кон} - \Delta t_{конт} + \Delta t_{деф} + \Delta t_{н} - \Delta t_{ох}, \quad (2)$$

где  $t_{i-1}$  – температура полосы в  $(i-1)$ -й точке технологического процесса;  $\Delta t_{из}$  – потери температуры за счет излучения тепловой энергии;  $\Delta t_{кон}$  – потери температуры за счет конвективного теплообмена с окружающей средой;  $\Delta t_{конт}$  – потери температуры за счет контактного теплообмена;  $\Delta t_{деф}$  – разогрев полосы в очаге деформации за счет энергии пластического формоизменения;  $\Delta t_{н}$  – повышение температуры в подогревающем устройстве;  $\Delta t_{ох}$  – понижение температуры в охлаждающем устройстве.

После выхода заготовки из нагревательной печи при ее транспортировке к стану 2300 первой реверсивной уширительной клетки происходит падение температуры за счет излучения и конвекции.

Изменение температуры за счет излучения определяется по формуле [18]

$$\Delta t_{из} = \frac{2 \cdot C_0 \cdot \xi \cdot (h_3 \cdot b_3 + (h_3 + b_3) \cdot l_3) \cdot \frac{l_{тр}}{v_{тр}}}{c \cdot \rho \cdot l_3 \cdot h_3 \cdot b_3} \times \left[ \left( \frac{t_{н} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_{с} + 273}{100} \right)^4 \right], \quad (3)$$

где  $C_0$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела;  $\xi$  – степень черноты поверхности металла;  $\rho$  – плотность металла;  $l_3, h_3, b_3$  – длина, высота, ширина заготовки соответственно;  $v_{тр}$  – скорость транспортировки заготовки;  $l_{тр}$  – расстояние транспортировки;  $t_n$  – температура нагрева заготовки в печи;  $t_c$  – температура окружающей среды;  $c$  – теплоемкость металла.

Изменение температуры за счет конвекции определяется по формуле

$$\Delta t_{кон} = \frac{0,045 \cdot \left( \frac{4 \cdot v_{тр} \cdot h_3 \cdot b_3}{(h_3 + b_3) \cdot v_B} \right)^{0,62} \cdot (h_3 \cdot b_3 + (h_3 + b_3) \cdot l_3)}{c \cdot \rho \cdot l_3 \cdot h_3^2 \cdot b_3^2} \times$$

$$\times (h_3 + b_3) \cdot \frac{l_{тр}}{v_{тр}} \cdot \lambda_B \cdot (t_n - t_c), \quad (4)$$

где  $\lambda_B$  – коэффициент теплопроводности воздуха;  $v_B$  – кинематический коэффициент вязкости воздуха.

Изменение температуры металла за счет прохождения заготовки через гидросбив можно определить по формуле

$$\Delta t_r = \frac{\alpha_{кин} \cdot b_3 \cdot l_3}{v_{тр}} \cdot (T_3 - T_{нас}), \quad (5)$$

где  $\alpha_{кин}$  – коэффициент теплоотдачи от гидросбива к полосе;  $T_{нас}$  – температура насыщения.

Прокатка полосы в реверсивной уширительной клетки дуо стана 2300 происходит за несколько проходов. При прокатке происходит падение температуры не только за счет излучения и конвекции, но и за счет теплообмена с валками, также происходит нагрев металла за счет энергии деформирования.

Изменение температуры за счет излучения в реверсивной клетки дуо находится по формуле [18]

$$\Delta t_{из} = \frac{2 \cdot C_0 \cdot \xi \cdot \left( \tau_n + \frac{l_1}{v_1} \right)}{c \cdot \rho} \cdot \left( \frac{h_0 + b_0}{h_0 \cdot b_0} + \frac{1}{l_0} \right) \times$$

$$\times \left[ \left( \frac{t_0 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_c + 273}{100} \right)^4 \right], \quad (6)$$

где  $l_0, h_0, b_0$  – начальная длина, высота, ширина заготовки на входе в клеть, соответственно;  $l_1$  – длина раската на выходе из очага деформации;  $v_1$  – скорость раската на выходе из очага де-

формации;  $\tau_n$  – время паузы при реверсе раската;  $t_0$  – температура заготовки на входе в клеть.

Изменение температуры за счет конвекции при прокатке в реверсивной клетки дуо стана 2300 находится по формуле [18]

$$\Delta t_{кон} = \frac{1,32 \cdot \lambda_B \cdot \sqrt{\frac{v_1}{v_B \cdot b_0}} \cdot \left( \tau_n + \frac{l_1}{v_1} \right)}{c \cdot \rho} \cdot \left( \frac{h_0 + b_0}{h_0 \cdot b_0} + \frac{1}{l_0} \right) \cdot (t_0 - t_c), \quad (7)$$

При горячей листовой прокатке потери температуры за счет контактного теплообмена с рабочими валками в очаге деформации определяются по формуле [18]

$$\Delta t_{вал} = \frac{\alpha_B}{c(t_0) \cdot \rho \cdot v_1} \cdot \frac{(b_0 + b_1) \cdot \sqrt{R \cdot (h_0 - h_1)}}{h_1 \cdot b_1} \cdot (t_0 - t_B), \quad (8)$$

где  $\alpha_B$  – коэффициент теплопередачи между полосой и рабочими валками;  $R$  – радиус рабочих валков;  $h_1, b_1$  – толщина и ширина раската на выходе из клетки соответственно;  $t_B$  – температура рабочих валков.

Разогрев полосы в очаге деформации за счет энергии пластического формоизменения при горячей листовой прокатке определим по формуле [19]

$$\Delta t_{деф} = \frac{p_{ср} \cdot \ln \frac{h_0}{h_1}}{c \cdot \rho}, \quad (9)$$

где  $p_{ср}$  – среднее удельное усилие прокатки, Па.

Расчет температуры металла при прокатке в универсальной реверсивной клетки стана 2300 определяется по формулам (3)–(9).

За то время пока подкат идет из универсальной реверсивной клетки стана 2300 к непрерывному стану 1700, в межклетевом промежутке стана 1700, в промежутках между станом и моталками горячей смотки происходит падение температуры за счет излучения и конвективного теплообмена с окружающей средой.

Изменение температуры за счет излучения определяется по формуле [18]

$$\Delta t_{из} = \frac{2 \cdot C_0 \cdot \xi}{c(t_0) \cdot \rho \cdot v_0} \cdot \left( \frac{h_0 + b_0}{h_0 \cdot b_0} \cdot l + \frac{1}{2} \right) \times$$

$$\times \left[ \left( \frac{t_0 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_c + 273}{100} \right)^4 \right], \quad (10)$$

где  $v_0$  – скорость полосы на входе в клетки и моталки горячей смотки;  $l$  – расстояние движения полосы между клетями стана.

Изменение температуры за счет конвективного теплообмена определяется по формуле [18]

$$\Delta t_{\text{кон}} = \frac{1,32 \cdot \lambda_{\text{в}}}{c(t_0) \cdot \rho \cdot \sqrt{v_{\text{в}} \cdot b_0 \cdot v_0}} \cdot \left( \frac{(h_0 + b_0) \cdot l}{h_0 \cdot b_0} + \frac{1}{2} \right) \cdot (t_0 - t_c) \cdot (11)$$

Для расчета изменения температуры в стане непрерывном стане 1700 за счет разогрева при деформации полосы и контактного теплообмена с валками можно воспользоваться формулами (7) и (8).

Для проверки адекватности математической модели были проведены расчеты температурных режимов на стане 2300/1700 ПАО «ЧМК» для стали марки 12Х18Н10Т. Для расчета взят сляб размерами 170×1540×3700 мм для прокатки в рулон размерами 5×1540 мм. На **рис. 2** приведены результаты расчетов, показывающих изменение температуры металла от нагревательной печи до выхода из универсальной клетки стана 2300. На **рис. 3** показано изменение температуры металла от подогривательной печи до моталок горячей смотки полосы, полученное расчетом по модели.

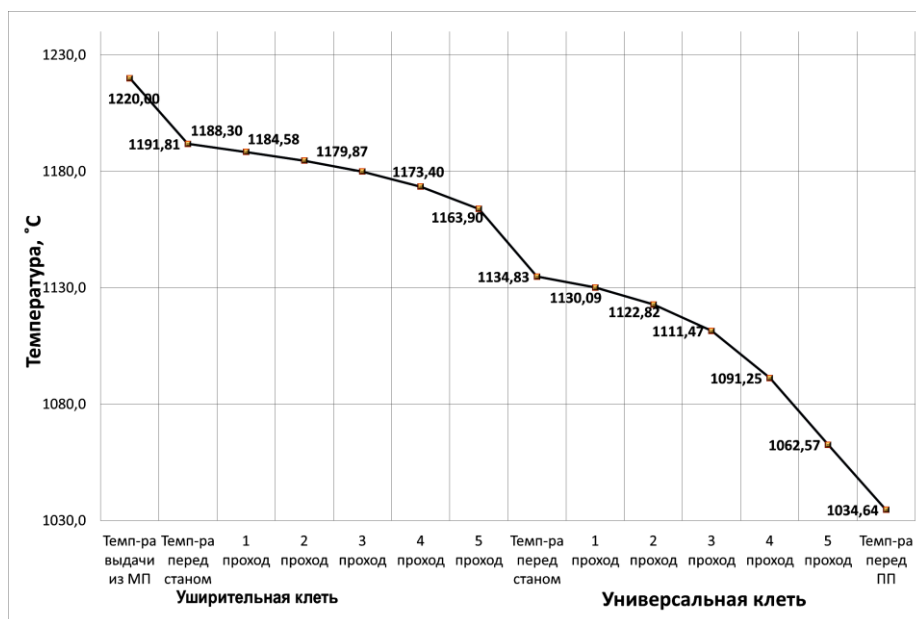


Рис. 2. График изменения температуры металла на стане 2300  
Fig. 2. A steel temperature curve on mill 2300

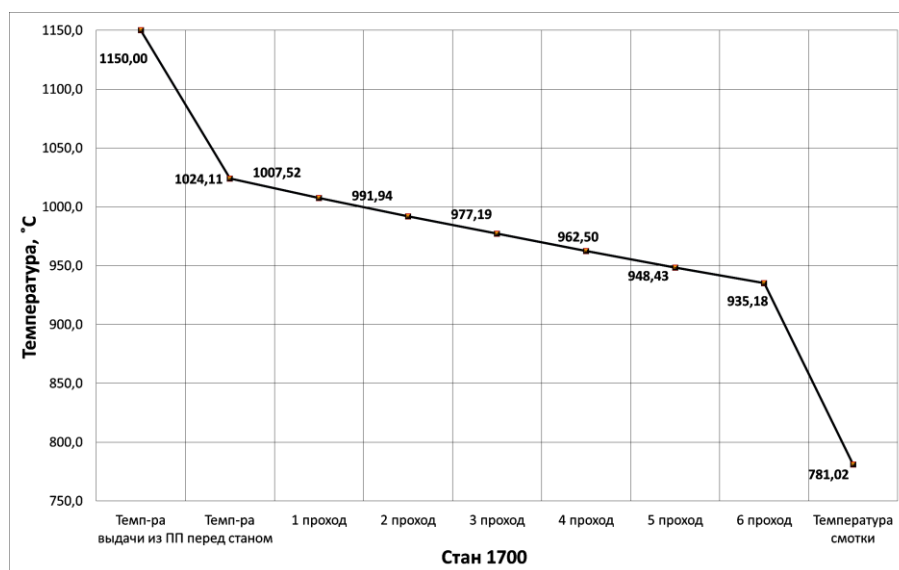


Рис. 3. График изменения температуры металла на стане 1700  
Fig. 3. A steel temperature curve on mill 1700



Экспериментально замеры температур осуществлялись в условиях прокатного цеха № 4 ПАО «ЧМК» с помощью радиационного пирометра ТЕРА-50. Замеры проводились в уширительной и универсальной клетях. Фактические замеры при прокатке на стане 1700 осуществлялись после 8-й клетки и на моталках горячей смотки полосы. В **таблице** показано сравнение расчетных и экспериментальных температур металла при прокатке на стане 2300/1700. Проверка адекватности модели показала, что разработанная математическая модель может быть использована для проектирования новых и совершенствования существующих режимов прокатки.

Разработанная математическая модель может быть использована для анализа и совершенствования используемых на стане 2300/1700 режимов прокатки, а также для разработки новых при освоении нового сортамента листового проката. В качестве примера приведены результаты расчета влияния температуры нагрева промежуточного проката в подогревательной печи между станами 2300 и 1700 на температуру конца прокатки (**рис. 4**).

### Заключение

Разработана математическая модель расчета температуры металла на стане горячей листовой прокатки. Математическая модель учитывает потери температуры металла в процессе прокатки и транспортировке по линии стана, разогрев полосы в процессе деформации, подогрев заготовки в промежуточной подогревательной печи, падение температуры проката при прохождении охлаждающих устройств. Разработанная математическая модель прошла промышленную проверку адекватности в условиях стана 2300/1700 ПАО «Челябинский металлургический комбинат». Математическая модель позволяет определять и фиксировать температуру металла по всей линии стана, т.е. от нагревательных методических печей до моталок горячей смотки полосы. Разработанная модель может быть использована как для научных исследований, так и в качестве инструмента для инженерных расчетов температурных режимов прокатки листа.

Таблица. Сравнение расчетной и экспериментальной температуры металла в контрольных точках стана 2300/1700  
Table. Calculated and experimental steel temperatures at control points of mill 2300/1700

Температура в контрольной точке стана, °С	Уширительная клетка стана 2300	Универсальная клетка стана 2300	Клетка № 8 стана 1700	Моталки горячей смотки
Расчетная	1163,9	1062,6	938,5	782,3
Экспериментальная	1130...1100	1100...1050	920...900	800...760

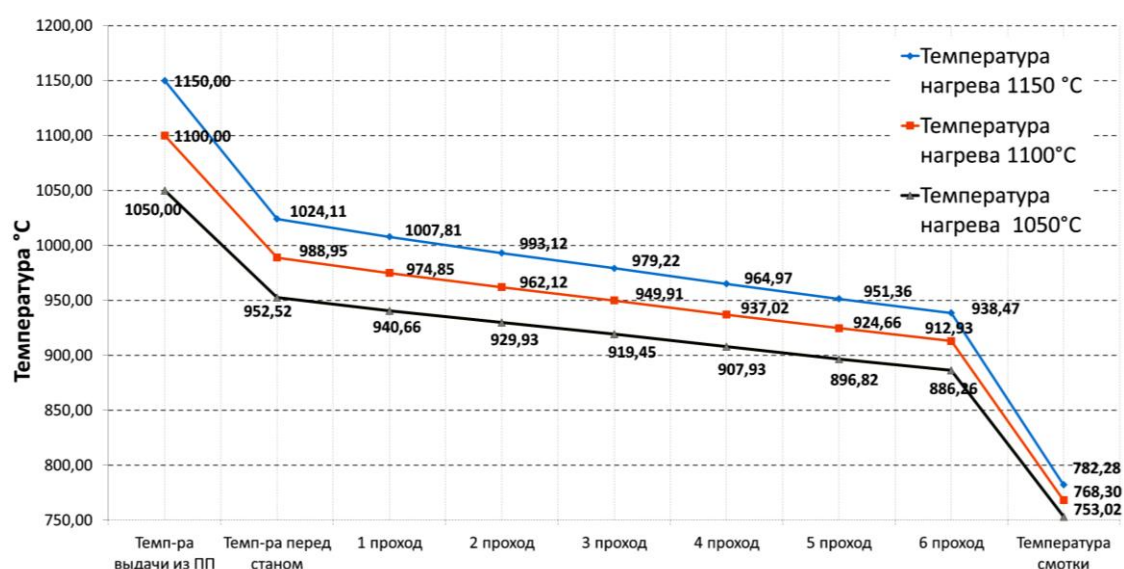


Рис. 4. Влияние температуры нагрева проката в подогревательной печи на температуру металла при прокатке на стане 1700

Fig. 4. Effect of heating temperature of rolled products in a preheating furnace on steel temperature during rolling on mill 1700

## Список литературы

1. Грудев А.П., Машкин Л.Ф., Ханин М.И. Технология прокатного производства: учебник для вузов. М.: Металлургия, 1994. 656 с.
2. Теория прокатки: справочник / А.И. Целиков, А.Д. Томленов, В.И. Зюзин и др. М.: Металлургия, 1982. 335 с.
3. Коновалов Ю.В. Справочник прокатчика. Справочное издание. В 2-х кн. Кн. 1. Производство горячекатаных листов и полос. М.: Теплотехник, 2008. 640 с.
4. Технология процессов прокатки и волочения. Листопркатное производство: учебник / М.М. Сафьян, В.Л. Мазур, А.М. Сафьян, А.И. Молчанов. Киев: Выща шк., 1988. 352 с.
5. Тонкослябовые литейно-прокатные агрегаты для производства стальных полос / В.М. Салганик, И.Г. Гун, А.С. Карандаев, А.А. Радионов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 506 с.
6. Коцарь С.Л., Белянский А.Д., Мухин Ю.А. Технология листопркатного производства. М.: Металлургия, 1997. 272 с.
7. Выбор стратегии и режимов охлаждения проката для достижения требуемого комплекса потребительских свойств / В.В. Курбан, Д.С. Федоров, В.М. Салганик, А.М. Песин // Черная металлургия. 2011. № 4 (1336). С. 64–69.
8. Радионова Л.В., Бужланова Ю.В. Применение математических моделей для прогнозирования микроструктуры и механических свойств катанки из высокоуглеродистых марок стали // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, 2008. № 4 (24). С. 73–75.
9. Математическая модель расчета температуры раската в процессе горячей листовой прокатки методом критерияльных уравнений / И.А. Сердюк, А.С. Хаджинов, С.Г. Дворников, А.А. Холодный, А.Г. Присяжный // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия «Технические науки», 2011. № 2 (23). С. 80–86.
10. Математическое моделирование взаимосвязанных электромеханических систем непрерывной подгруппы клетей прокатного стана. Часть 1. Разработка математической модели / А.А. Радионов, А.С. Карандаев, И.Ю. Андрияшин и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2015. Т. 15, № 1. С. 59–73.
11. Согласование скоростных режимов электроприводов клетей непрерывной группы прокатного стана / А.С. Карандаев, В.Р. Храмынин, А.А. Радионов и др. // Вестник ИГЭУ, 2013. Вып. 1. С. 98–103.
12. Ограничение минимальных скоростей электроприводов стана 2000 при прокатке трубной заготовки / А.А. Радионов, И.Ю. Андрияшин, В.В. Галкин, А.Н. Гостев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. № 3. С. 20–23.
13. Генкин А.Л. Информативность энергосиловых параметров при управлении температурно-скоростным режимом горячекатаной полосы // Автоматизация в промышленности. 2009. № 8. С. 45–48.
14. Радионова Л.В., Сарапулов О.А. Математическая модель охлаждения катанки на мелкосортном стане // Наука и производство Урала. 2014. № 10. С. 171–174.
15. Автоматическое управление геометрией проката на толстолистовом стане 5000 горячей прокатки / В.Р. Гасияров, Д.Ю. Усатый, А.А. Радионов, Л.В. Радионова // Материалы 4-й Всероссийской мультikonференции по проблемам управления «МКПУ-2011», 2011. С. 307–309.
16. Дубинский Ф.С., Соседкова М.А. Моделирование температурных режимов с целью оптимизации сортовой прокатки // New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering: XIN International scientific conference; Ченстохова (Польша). 2013. С. 353–357.
17. Sosedkova M.A., Radionova L.V., Lisovskaya T.A. Mathematical Model of Hot Rolling Temperature Parameters // Solid State Phenomena. 2017. Т. 265 SSP. P. 1026–1033.
18. Mathematical Model of Temperature Conditions of Sheet Mills with Furnace Coilers / M.A. Sosedkova, A.S. Grigorenko, L.V. Radionova, T.A. Lisovskaya, V.D. Lezin // Materials Science Forum, 2020, 989 MSF, pp. 711–718.
19. Венцель Х. Прокатка и прокатное оборудование // ВИНТИ. Экспресс-информация. 1965. № 27. С. 8–43.

## References

1. Grudev A.P., Mashkin L.F., Khanin M.I. *Tekhnologiya prokatnogo proizvodstva: uchebnik dlya vuzov* [Rolling technology: the textbook for universities]. Moscow: Metallurgy, 1994, 656 p. (In Russ.)
2. Tselikov A.I., Tomlenov A.D., Zyuzin V.I. et al. *Teoriya prokatki: spravochnik* [Theory of rolling: a reference book]. Moscow: Metallurgy, 1982, 335 p. (In Russ.)
3. Kononov Yu.V. *Spravochnik prokatchika. Spravochnoe izdanie. V 2-kh kn. Kniga 1. Proizvodstvo goryachekatanых листов i polos* [The reference book for rolling engineers. Reference edition. In 2 books. Book 1. Production of hot-rolled sheets and strips]. Moscow: Teplotekhnika, 2008, 640 p. (In Russ.)
4. Safyan M.M., Mazur V.L., Safyan A.M., Molchanov A.I. *Tekhnologiya protsessov prokatki i volocheniya. Listoпркатное производство: uchebnik* [Technology of rolling and drawing processes. Sheet rolling: the textbook]. Kyiv: Vyshcha shkola, 1988, 352 p. (In Russ.)
5. Salganik V.M., Gun I.G., Karandaev A.S., Radionov A.A. *Tonkoslyabovye liteyno-prokatnye agregaty dlya proizvodstva stalnykh polos* [Thin slab casting and rolling facilities for the production of steel strips]. Moscow: Bauman MSTU, 2003, 506 p. (In Russ.)

6. Kotsar S.L., Belyansky A.D., Mukhin Yu.A. *Tekhnologiya listoprokatnogo proizvodstva* [Sheet rolling technology]. Moscow: Metallurgy, 1997, 272 p. (In Russ.)
7. Kurban V.V., Fedorov D.S., Salganik V.M., Pesin A.M. The selection of the cooling strategy and modes for rolled products to achieve the required complex of consumer properties. *Chernaya metallurgiya* [Ferrous Metallurgy], 2011, no. 4 (1336), pp. 64–69. (In Russ.)
8. Radionova L.V., Buzhlanova Yu.V. Application of mathematical models for prediction of microstructure and mechanical properties of rods of high carbon steel grades. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2008, no. 4 (24), pp. 73–75. (In Russ.)
9. Serdiuk I.A., Khadzhinov A.S., Dvornikov S.G., Kholodnyi A.A., Prisyazhnyi A.G. Mathematical model of calculating the temperature of rolling in the process of hot sheet rolling by the method of criterial equations. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskie nauki»* [Bulletin of Priazovsky State Technical University. Technical Sciences], 2011, no. 2 (23), pp. 80–86. (In Russ.)
10. Radionov A.A., Karandaev A.S., Andryushin I.Yu. et al. Mathematical modeling of the interrelated electric and mechanical systems of a continuous sub-group of the rolling mill stands. Part 1. Development of a mathematical model. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Energetika»* [Bulletin of SUSU. Power Engineering], 2015, vol. 15, no. 1, pp. 59–73. (In Russ.)
11. Karandaev A.S., Khrumshin V.R., Radionov A.A. et al. Coordination of speed modes of electric drives for stands of a continuous group of the rolling mill. *Vestnik IGEU* [Bulletin of ISEU], 2013, no. 1, pp. 98–103. (In Russ.)
12. Radionov A.A., Andryushin I.Yu., Galkin V.V., Gostev A.N. Limiting minimum speeds of electric drives of mill 2000, when rolling a pipe billet. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2011, no. 3, pp. 20–23. (In Russ.)
13. Genkin A.L. Information on energy-power parameters in controlling the temperature-speed mode of hot-rolled strip. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti* [Automation in the Industry], 2009, no. 8, pp. 45–48. (In Russ.)
14. Radionova L.V., Sarapulov O.A. Mathematical model of rod cooling in a small section mill. *Nauka i proizvodstvo Urala* [Science and Manufacturing of the Urals], 2014, no. 10, pp. 171–174. (In Russ.)
15. Gasiyarov V.R., Usaty D.Yu., Radionov A.A., Radionova L.V. Automatic control of the rolling geometry on a 5000 mm plate mill. *Materialy 4-y Vserossiyskoy multikonferentsii po problemam upravleniya "MKPU-2011"* [Proceedings of the Fourth All-Russian Multi-Conference on Management Problems MCMP-2011], 2011, pp. 307–309. (In Russ.)
16. Dubinskiy F.S., Sosedkova M.A. Temperature simulation to optimize long product rolling. New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering: XIV International scientific conference, Czestochowa (Poland), pp. 353–357 (2013).
17. Sosedkova M.A., Radionova L.V., Lisovskaya T.A. Mathematical model of hot rolling temperature parameters. *Solid State Phenomena*, 265, pp. 1026–1033 (2017).
18. Sosedkova M.A., Grigorenko A.S., Radionova L.V., Lisovskaya T.A., Lezin V.D. Mathematical model of temperature conditions of sheet mills with furnace coilers. *Materials Science Forum*, 989, pp. 711–718 (2020).
19. Wenzel H. Rolling and rolling equipment. *VINITI. Ekspress-informatsiya* [The All-Union Institute of Scientific and Technical Information. Express information], 1965, no. 27, pp. 8–43. (In Russ.)

Поступила 23.11.2020; принята к публикации 08.12.2020; опубликована 25.12.2020  
Submitted 23/11/2020; revised 08/12/2020; published 25/12/2020

**Радионова Людмила Владимировна** – кандидат технических наук, доцент,  
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.  
Email: radionovalv@susu.ru ORCID 0000-0001-9587-2925

**Соседкова Марина Алексеевна** – старший преподаватель,  
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.  
Email: sosedkovama@susu.ru

**Григоренко Александр Сергеевич** – студент,  
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.  
Email: GrAS1996@mail.ru ORCID 0000-0002-0052-669X

**Lyudmila V. Radionova** – PhD (Eng.), Associate Professor,  
South Ural State University (SUSU), Chelyabinsk, Russia.  
Email: radionovalv@susu.ru, ORCID 0000-0001-9587-2925

**Marina A. Sosedkova** – Senior Lecturer  
South Ural State University (SUSU), Chelyabinsk, Russia.  
Email: sosedkovama@susu.ru

**Alexander S. Grigorenko** – student  
South Ural State University (SUSU), Chelyabinsk, Russia.  
Email: GrAS1996@mail.ru, ORCID 0000-0002-0052-669X

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.77.04

DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-4-32-38



## АНАЛИЗ МИРОВОГО УРОВНЯ РАЗРАБОТОК В ОБЛАСТИ ПРОИЗВОДСТВА ГОРЯЧЕКАТАНОГО ВЫСОКОПРОЧНОГО ХЛАДОСТОЙКОГО ЛИСТОВОГО ПРОКАТА С ПРЕДЕЛОМ ТЕКУЧЕСТИ $\geq 600 \text{ Н/мм}^2$

Полецков П.П., Кузнецова А.С., Алексеев Д.Ю., Никитенко О.А., Лопатина Е.В.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

**Аннотация.** Обоснована перспективность применения высокопрочных конструкционных сталей при изготовлении сварных конструкций, подъемно-транспортного оборудования и различных элементов техники, эксплуатируемой в условиях низких температур Крайнего Севера (до  $-60^\circ\text{C}$ ). Показано, что основным нормативным документом, регламентирующим комплекс требований к химическому составу и уровню механических свойств конструкционных высокопрочных хладостойких сталей, является европейский стандарт EN 10025-6. На основе анализа нормативных документов, а также технических спецификаций крупных отечественных и зарубежных производителей данного вида проката определен комплекс требований, которым должна отвечать продукция: высокая прочность ( $\sigma_b = 700\text{--}950 \text{ Н/мм}^2$ ,  $\sigma_t \geq 600 \text{ Н/мм}^2$ ), пластичность (относительное удлинение  $\delta_5$  не менее 14%, минимальный радиус изгиба  $\geq 2t$ ), также низкотемпературная ударная вязкость ( $KCV-60 \geq 34 \text{ Дж/см}^2$ ). Выявлено, что достижение требуемого комплекса свойств в толщинах от 8 до 50 мм обеспечивается путем закалки стали с последующим высоким отпусканием, а для толщин до 10 мм также за счет применения технологии контролируемой прокатки и ускоренного охлаждения.

**Ключевые слова:** высокопрочная хладостойкая сталь, технические требования, листовая горячекатаная сталь северного исполнения, конструкционная сталь, механические свойства.

*Работа выполнена в рамках государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук и докторов наук и ведущих научных школ Российской Федерации – гранта Президента РФ (Соглашение №075-15-2020-205 от 17.03.2020 г. (вн. № МК-1979.2020.8)).*

© Полецков П.П., Кузнецова А.С., Алексеев Д.Ю., Никитенко О.А., Лопатина Е.В., 2020

### Для цитирования

Анализ мирового уровня разработок в области производства горячекатаного высокопрочного хладостойкого листового проката с пределом текучести  $\geq 600 \text{ Н/мм}^2$  / Полецков П.П., Кузнецова А.С., Алексеев Д.Ю., Никитенко О.А., Лопатина Е.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №4. С. 32–38. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-4-32-38>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



## ANALYSIS OF GLOBAL DEVELOPMENT IN PRODUCING HOT-ROLLED HIGH-STRENGTH COLD-RESISTANT SHEETS WITH A YIELD STRENGTH OF 600 MPa AND OVER

Poletskov P.P., Kuznetsova A.S., Alekseev D.Yu., Nikitenko O.A., Lopatina E.V.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

**Abstract.** The paper contains a rationale for the prospect of using high-strength structural steels in manufacturing welded structures, hoisting and transport equipment and various elements of equipment operating at low temperatures in the Far North (down to  $-60^{\circ}\text{C}$ ). It is shown that EN 10025-6 is a main document regulating the set of requirements for the chemical composition and mechanical properties of structural high-strength cold-resistant steels. By analyzing the regulatory documents, as well as technical specifications of large Russian and foreign manufacturers of this type of rolled products, the authors determined a set of requirements to be met by the products: high strength ( $R_m = 700\text{--}950\text{ MPa}$ ,  $R_{eH} \geq 600\text{ MPa}$ ), ductility (relative elongation  $A_5 \geq 14\%$ , minimum bending radius  $\geq 2t$ ), as well as resistance to low temperatures ( $KCV^{-60} \geq 34\text{ J/cm}^2$ ). It was revealed that the required set of properties for steel products with a thickness of 8 to 50 mm was achieved by steel quenching followed by high tempering, and for thicknesses of up to 10 mm by using controlled rolling and accelerated cooling.

**Keywords:** high-strength cold-resistant steel, technical requirements, hot-rolled steel sheets for Arctic service, structural steel, mechanical properties.

*The research was funded as part of the state support of young Russian researchers – PhD holders and doctors of sciences and leading scientific schools of the Russian Federation – by the grant of the President of the Russian Federation (Agreement No.075-15-2020-205 dated 17.03.2020 (internal No. MK-1979.2020.8)).*

### For citation

Poletskov P.P., Kuznetsova A.S., Alekseev D.Yu., Nikitenko O.A., Lopatina E.V. Analysis of Global Development in Producing Hot-Rolled High-Strength Cold-Resistant Sheets with a Yield Strength of 600 MPa and over. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020, vol. 18, no. 4, pp. 32–38. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-4-32-38>

### Введение

Традиционно при производстве несущих сварных каркасных конструкций, подъемно-транспортного оборудования, деталей узлов, рамных и корпусных элементов горнодобывающей техники используются малоуглеродистые и обычные низколегированные конструкционные стали. Однако эффективность их работы в сложных климатических условиях в районах Крайнего Севера при температурах до  $-60^{\circ}\text{C}$  резко снижается, что также усугубляется воздействием агрессивных сред, статических, динамических, импульсных и циклических нагрузок, интенсивным абразивным износом. Перспективными в данном направлении являются высокопрочные стали, обладающие достаточной прочностью, чтобы выдерживать высокие нагрузки, а также удовлетворительной пластичностью и вязкостью, малой чувствительностью к концентраторам напряжений и малой склонностью к хрупкому разрушению при низких

и сверхнизких критических температурах, хорошей свариваемостью, необходимой для изготовления герметичной аппаратуры, труб и тонкостенных конструкций [1–7]. Помимо этого, использование высокопрочных сталей взамен обычных конструкционных позволяет уменьшить толщину материала без потери конструктивной прочности, что, в свою очередь, ведет к снижению массы металлоконструкций, уменьшению трудоемкости строительно-монтажных работ и затрат на транспортировку металла. Это вызывает необходимость разработки новых инновационных материалов, определяющих их функциональное назначение, а также развитие технологий их обработки [8–14].

### Основная часть

Основным нормативным документом, регламентирующим требования к высокопрочным сталям, в том числе и в хладостойком исполнении, является европейский стандарт



EN 10025-6 [15]. Согласно данному стандарту высокопрочные конструкционные стали северного исполнения поставляются в термоулучшенном состоянии (после закалки и высокого отпуска) по 6 группам прочности с пределом текучести от 460 Н/мм<sup>2</sup> (при толщине от 3 до 50 мм). Для обеспечения долгосрочной эксплуатации конструкций и оборудования высокопрочный листовой прокат должен подвергаться испытаниям на растяжение, ударный изгиб (KCV) при пониженных температурах, а также при толщине от 3 до 16 мм на изгиб до угла 90°. Требования по механическим свой-

ствам высокопрочного проката в северном исполнении для различных групп прочности представлены в **табл. 1**.

Помимо требований по механическим свойствам в стандарте регламентируется предельное массовое содержание основных легирующих элементов в стали (**табл. 2**). Поскольку рассматриваемый вид высокопрочного листового проката предназначен для изготовления сварных конструкций, необходимым условием также является ограничение верхнего значения углеродного эквивалента CEV для обеспечения удовлетворительной свариваемости стали.

Таблица 1. Требования к механическим свойствам высокопрочного проката северного исполнения в соответствии с EN 10025-6

Table 1. Requirements for mechanical properties of high-strength rolled products for Arctic service as per EN 10025-6

Группа прочности	Механические свойства							
	Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , Н/мм <sup>2</sup> , не менее	Временное сопротивление разрыву $\sigma_b$ , Н/мм <sup>2</sup>	Относительное удлинение $\delta_5$ , % не менее	Ударная вязкость в поперечном направлении, Дж, не менее			Минимальный радиус оправки при изгибе, мм	
				KCV <sup>-20</sup>	KCV <sup>-40</sup>	KCV <sup>-60</sup>	⊥	=
S460QL1	460	550-720	17	35	30	27	3,0t	4,0t
S500QL1	500	590-770	17					
S550QL1	550	640-820	16					
S620QL1	620	700-890	15					
S690QL1	690	770-940	14					
S890QL1	890	940-1100	11					

Таблица 2. Требования к химическому составу высокопрочного проката северного исполнения в соответствии с EN 10025-6 по ковшевой пробе

Table 2. Requirements for a chemical composition of high-strength rolled products for Arctic service as per EN 10025-6 by a ladle sample

Группа прочности	C	Si	Mn	P	S	N	B	Cr	Cu	Mo	Nb	Ni	Ti	V	CEV, % не бо- лее
	Массовая доля химических элементов, %, не более														
S460QL1	0,20	0,80	1,7	0,020	0,010	0,015	0,005	1,50	0,50	0,70	0,06	2,0	0,05	0,12	0,47
S500QL1															
S550QL1															0,65
S620QL1															
S690QL1															
S890QL1															

С целью оценки мирового уровня разработок в области производства высокопрочных конструкционных листовых сталей северного исполнения был проведен анализ технических характеристик выпускаемого отечественными и зарубежными производителями проката. Наиболее крупными зарубежными производителями высокопрочного листового проката, на долю которых приходится большая часть мирового рынка, являются: Dillinger (Германия), SSAB (Швеция) и Voestalpine Stahl GmbH (Австрия). На территории России производство высокопрочных конструкционных сталей обеспечивают ПАО «ММК» и ПАО «Северсталь» [16–18]. Химический состав и достигаемый уровень механических свойств сталей, реализуемых указанными компаниями, представлены в табл. 3 и 4 соответственно.

Установлено, что для достижения требуемого комплекса механических свойств при производстве высокопрочных конструкционных сталей северного исполнения с пределом текучести более 600 Н/мм<sup>2</sup> используется низкоуглеродистая сталь с содержанием **C** до 0,20% масс. и добавлением микролегирующих элементов в виде **V** до 0,20% или комплексно **Nb-V-Ti** до 0,44%. Для зарубежных производителей характерным является легирование стали **Mn** до 2,1%. В сталях, выпускаемых

отечественными производителями, содержание **Mn** не превышает 1,2%. Также высокопрочные стали, производимые по технологии закалки и высокого отпуска, характеризуются достаточно большим содержанием **Cr** – до 1,7%, а также наличием дорогостоящих легирующих элементов – **Ni** до 2,0% и **Mo** до 0,7%. Помимо этого, термически улучшаемые высокопрочные стали отличаются микродобавками **B** до 0,006% для повышения их прокаливаемости.

Кроме того, на основе анализа технических спецификаций определено, что для обеспечения надежности и долговечности при эксплуатации металлоконструкций и оборудования в условиях Крайнего Севера прокат для их производства должен сочетать в себе такие свойства, как высокая прочность ( $\sigma_b = 700\text{--}950 \text{ Н/мм}^2$ ,  $\sigma_T \geq 600 \text{ Н/мм}^2$ ), пластичность (относительное удлинение  $\delta_5$  не менее 14%, минимальный радиус изгиба  $\geq 2t$ ), а также стойкость к низким температурам ( $KCV-60 \geq 34 \text{ Дж/см}^2$ ). При этом достижение требуемого комплекса свойств обеспечивается путем закалки стали с проведением последующего высокого отпуска, а для толщин до 10 мм также за счет применения технологии контролируемой прокатки и ускоренного охлаждения.

Таблица 3. Химический состав отечественных и зарубежных высокопрочных хладостойких марок сталей  
Table 3. Chemical composition of Russian and foreign high-strength cold-resistant steel grades

Марка стали (страна)	Массовая доля элементов, %													
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Cu	Ni	Mo	Nb	V	Ti	B	Al
	не более													не менее
Strenx 600 MC (TM) (Швеция)	0,12	0,21	1,90	0,010	0,025	-	-	-	-	0,09	0,20	0,15	-	0,015
Strenx 650 MC (TM) (Швеция)	0,12	0,21	2,00	0,010	0,025	-	-	-	-	0,09	0,20	0,15	-	0,015
Strenx 700 MC (TM) (Швеция)	0,12	0,21	2,10	0,010	0,020	-	-	-	-	0,09	0,20	0,15	-	0,015
Strenx 700 MC plus (TM) (Швеция)	0,12	0,25	2,10	0,010	0,020	-	-	-	-	0,09	0,20	0,15	-	0,015
Strenx 700 (QT) (Швеция)	0,20	0,60	1,60	0,010	0,020	0,80	0,30	2,0	0,70	-	-	-	0,005	-
Aldur 620 (QT) (Австрия)	0,20	0,80	1,70	0,010	0,020	1,50	0,50	2,0	0,70	0,06	0,12	0,05	0,005	0,018
Aldur 700 (QT) (Австрия)	0,20	0,80	1,70	0,010	0,020	1,50	0,50	2,0	0,70	0,06	0,12	0,05	0,005	0,018
Dillimax 690 (QT) (Германия)	0,20	0,50	1,60	0,005	0,018	1,50	-	1,8	0,60	V+Nb 0,10		-	0,004	-
14X2ГМР (QT) (Россия)	0,17	0,37	1,20	-	-	1,70	0,30	0,3	0,55	-	0,03	-	0,006	-
14ХМНДФР (QT) (Россия)	0,17	0,37	0,90	-	-	0,70	0,40	1,0	0,55	-	0,10	-	0,006	-
09ХГН2МД (QT) (Россия)	0,11	0,33	0,67	0,003	0,007	0,70	0,70	2,2	0,35	-			-	0,036

Примечание:

«-» – в спецификации производителя не регламентируется; QT – состояние поставки после закалки и отпуска;

TM – термомеханическая прокатка.

Таблица 4. Уровень механических свойств высокопрочного хладостойкого конструкционного проката, достигаемый отечественными и зарубежными производителями  
 Table 4. Mechanical properties of high-strength cold-resistant structural steel rolled products achieved by Russian and foreign steelmakers

Марка стали (страна)	Механические свойства						Углеродный эквивалент				Изгиб		Состояние поставки						
	Толщина проката t, мм	Предел текучести σ <sub>0,2</sub> , МПа не менее	Временное сопротивление разрыву σ <sub>в</sub> , МПа	Относи- тельное удлинение δ <sub>5</sub> , %, не менее	Ударная вязкость в поперечном направлении, Дж/см <sup>2</sup> , не менее		t, мм	SEV не более	CET не более	t, мм	Минимальный радиус оправки, мм								
					KCV <sup>-20</sup>	KCV <sup>-40</sup>					⊥	=							
														KCV <sup>-60</sup>					
Strenx 600 MC (Швеция)	6,01-10	600	650-820	16	50	34	-	6,01-10	0,33*	0,21*	6,01-10	1,4t	TM						
Strenx 650 MC (Шве- ция)	6,01-10	650	700-850	14	50	34	-	6,01-10	0,34*	0,22*	6,01-10	1,5t	TM						
Strenx 700 MC (Швеция)	6,01-10	700	750-950	12	50	34	-	6,01-10	0,39*	0,25*	6,01-10	1,6t	TM						
Strenx 700 MC PLUS, (Швеция)	3-10	700	750-950	13	-	-	50	3-11,49	0,38*	0,24*	3-10	1,0t	TM						
	10,1-12	700	750-950	13	-	-	50	11,50-12	0,40*	0,26*	10,1-12	1,5t							
Strenx 700 (Швеция)	4-53	700	780-930	14	86	34	до 5	0,48	0,57	0,34	≤ 8	1,5t	QT						
	53,01-100	650	780-930	14				0,49	0,57	0,32	0,38	30,01-60		0,52	0,58	0,36	0,39	1,5t	2,0t
								0,58	0,58	0,39	0,39			15-20	2,0t	2,5t			
								0,67	0,67	0,41	0,41			>20	2,0t	2,5t			
								0,73	-	0,43	-								
	12-50	620	700-890	15				44	37	34	12-50	0,46*		0,29*	-	3t	4t	QT	
50,01-100	580	700-890	15	50,01-70	0,46*	0,29*													
				70,01-100	0,52*	0,32*													
Aldur 700 QL1, (Австрия)	12-50	700	770-940	14	44	37	34	12-30	0,46*	0,29*	-	3t	4t	QT					
	50,01-110	650	760-930	14				30,01-50	0,52*	0,32*									
								50,01-100	0,54*	0,35*									
Dillimax 690, (Германия)	6-65	690	770-930	14	50	34	6-25	0,50	0,35	0,38	-	2t	3t	QT					
	65-100	670	770-930	14				25,01-50	0,55			0,38							
								50,01-100	0,67			-							
14X2ГМР (Россия)	≤ 20	700	760-930	14	-	44	-	-	-	-	-	-	QT						
14ХМНДФР (Россия)	≤ 20	700	760-930	14	-	44	-	-	-	-	-	-	QT						
09ХГ12МД (Россия)	4-70	620	720-890	15	-	-	34	-	-	-	-	-	QT						

Примечания. Состояние поставки: QT – после закалки и отпуска; TM – после термомеханической прокатки.

\* Типичное значение (не гарантируется). Значение углеродного эквивалента SEV и CET определяется по анализу химического состава по ковшевой пробе, исходя из формул:

$$SEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni}{15} + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \quad (\text{согласно SEV'088})$$

$$CET = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni}{15} + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \quad (\text{согласно SEV'088})$$

## Выводы

На основе анализа технических спецификаций отечественных и зарубежных производителей определены:

- комплекс требований, которым должна соответствовать высокопрочная конструкционная сталь, эксплуатируемая в условиях Крайнего Севера:  $\sigma_b = 700\text{--}950 \text{ Н/мм}^2$ ,  $\sigma_T \geq 600 \text{ Н/мм}^2$ ,  $\delta_5 \geq 14\%$ ,  $KCV^{60} \geq 34 \text{ Дж/см}^2$ ;
- предельное содержание легирующих элементов для разработки новой высокопрочной эконом-нолегируемой стали;
- технологические способы производства, обеспечивающие получение требуемого комплекса свойств для проката толщиной от 8 до 50 мм, заключающиеся в проведении закалки с последующим высоким отпуском, а для толщин до 10 мм – за счет применения технологии контролируемой прокатки и ускоренного охлаждения.

## Список литературы

1. Рыбин В.В., Малышевский В.А., Хлусова Е. И. Высокопрочные свариваемые улучшаемые стали. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. 211 с.
2. Морстройтехнология. URL: <https://morproekt.ru/articles/prezentatsii/147-konstruktivno-tehnologicheskie-resheniya-kak-osnova-protivodejstviya-surovym-prirodno-klimaticheskim-usloviyam-krajnego-severa-pri-stroitelstve-gidrotekhnicheskikh-sooruzhenij>
3. Lv Z., Qian L., Liu S., Zhan L., Qin S Preparation and Mechanical Behavior of Ultra-High Strength Low-Carbon Steel // Materials. 2020. Т. 13. № 2. С. 459.
4. Анализ технических требований, предъявляемых к ультрахладостойкому листовому прокату / М.В. Чукин, П.П. Полецков, Д.Г. Набатчиков и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2017. Т. 17, № 2. С. 52–60.
5. Poletskov P.P., Nikitenko O.A., Kuznetsova A.S., Salganik V.M. The study of transformation kinetics for over-cooled austenite of the new high-strength steel with increased cold resistance // CIS Iron and Steel Review. 2020, vol. 19, pp. 56–59.
6. Исследование структуры и механических свойств высокопрочных конструкционных сталей / Банных О.А., Сорокин А.М., Банных И.О. и др. // Электрометаллургия. 2018. № 2. С. 2–7.
7. Солнцев Ю.П. Хладостойкие стали и сплавы: учебник для вузов. СПб.: Химиздат, 2017. 480 с.
8. Голосиенко С.А., Сошина Т.В., Хлусова Е.И. Новые высокопрочные хладостойкие стали для арктического применения // Производство проката. 2014. № 2. С. 17–24.
9. Инновационные металлические материалы: монография / К.В. Аксенова, Л.А. Барков, М.П. Барышников и др. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2016. 371 с.
10. Основные виды и области применения наноструктурированного высокопрочного листового проката / Чукин М.В., Салганик В.М., Полецков П.П. и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 4 (48). С. 41–44.
11. Тиссен Р. Г., Пауль Г., Зебальд Р. Новые высокопрочные марки сталей с улучшенными технологическими свойствами // Черные металлы. 2019. № 8. С. 51–55
12. Густов Д.Ю., Густов Ю.И., Юшков А.А. Исследование механических свойств высокопрочных сталей зарубежного производства для строительной техники // Механизация строительства. 2017. Т. 78. № 8. С. 46–49.
13. Разработка импортозамещающей технологии производства листового проката из высокопрочной конструкционной стали северного исполнения / Чукин М.В., Полецков П.П., Гущина М.С. и др. // Производство проката. 2019. № 4. С. 5–11.
14. BS EN 10025-6:2004 +A1:2009 Hot rolled products of structural steels — ICS 77.140.10; 77.140.50 Part 6: Technical delivery conditions for flat products of high yield strength structural steels in the quenched and tempered condition.
15. Металлоснабжение и сбыт. URL: <https://metalinforu.ru/news/116142>
16. Технические новинки. URL: <http://www.kobelcowelding.jp/russian/education-center/technicalhighlight/vol02.html>.
17. Северсталь. URL: <https://www.severstal.com/rus/catalogue/metal/severweld>.

## References

1. Rybin V.V., Malyshevsky V.A., Khlusova E.I. *Vysokoprochnye svarivaemye uluchshaemye stali* [High-strength weld-heat-treatable steels]. Saint Petersburg: Publishing house of the Polytechnic University, 2016, 211 p. (In Russ.)
2. Morstroytechnology. Available at: <https://morproekt.ru/articles/prezentatsii/147-konstruktivno-tehnologicheskie-resheniya-kak-osnova-protivodejstviya-surovym-prirodno-klimaticheskim-usloviyam-krajnego-severa-pri-stroitelstve-gidrotekhnicheskikh-sooruzhenij>
3. Lv Z., Qian L., Liu S., Zhan L., Qin S. Preparation and mechanical behavior of ultra-high strength low-carbon steel. Materials, 2020, vol. 13, no. 2, p. 459.
4. Chukin M.V., Poletskov P.P., Nabatchikov D.G. et al. Analysis of technical requirements for ultra cold-resistant

- steel sheets. *Vestnik YuUrGU. Seriya Metallurgiya* [Bulletin of SUSU. Metallurgy series], 2017, vol. 17, no. 2, pp. 52–60. (In Russ.)
5. Poletskov P.P., Nikitenko O.A., Kuznetsova A.S., Salganik V.M. The study of transformation kinetics for over-cooled austenite of the new high-strength steel with increased cold resistance. *CIS Iron and Steel Review*, 2020, vol. 19, pp. 56–59.
  6. Bannykh O.A., Sorokin A.M., Bannykh I.O. et al. Study on the structure and mechanical properties of high-strength structural steels. *Elektrometallurgiya* [Electrometallurgy], 2018, no. 2, pp. 2–7. (In Russ.)
  7. Solntsev Yu.P. *Khladostoykie stali i splavy: uchebnik dlya vuzov* [Cold-resistant steels and alloys: Textbook for universities]. Saint Petersburg: Khimizdat, 2017, 480 p. (In Russ.)
  8. Golosienko S.A., Soshina T.V., Khlusova E.I. New high-strength cold-resistant steels for Arctic applications. *Proizvodstvo prokata* [Rolled Products Manufacturing], 2014, no. 2, pp. 17–24. (In Russ.)
  9. Aksenova K.V., Barkov L.A., Baryshnikov M.P. et al. *Innovatsionnye metallicheskie materialy: monografiya* [Innovative metallic materials: monograph]. Magnitogorsk: NMSTU Publishing House, 2016, 371 p. (In Russ.)
  10. Chukin M.V., Salganik V.M., Poletskov P.P. et al. The main types and applications of nanostructured high-strength sheet metal. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2014, no. 4 (48), pp. 41–44. (In Russ.)
  11. Thiessen R.G., Paul G., Sebald R. Innovative high-strength steels with enhanced mechanical parameters. *Chernye Metally* [Ferrous Metals], 2019, no. 8, pp. 51–55. (In Russ.)
  12. Gustov D.Yu., Gustov Yu.I., Yushkov A.A. Study on mechanical properties of high-strength steels of foreign production for construction equipment. *Mekhanizatsiya stroitelstva* [Construction Mechanization], 2017, vol. 78, no. 8, pp. 46–49. (In Russ.)
  13. Chukin M.V., Poletskov P.P., Gushchina M.S. et al. Development of an import-substituting technology for the production of sheet products from high-strength structural steel for Arctic service. *Proizvodstvo prokata* [Rolled Products Manufacturing], 2019, no. 4, pp. 5–11. (In Russ.)
  14. BS EN 10025-6: 2004 + A1: 2009 Hot rolled products of structural steels - ICS 77.140.10; 77.140.50 Part 6: Technical delivery conditions for flat products of high yield strength structural steels in the quenched and tempered condition.
  15. *Metallosnabzhenie i sbyt* [Metal Supply and Sales]. Available at: <https://metalinfo.ru/ru/news/116142>
  16. Technical highlight. Available at: <http://www.kobelco-welding.jp/russian/education-center/technical-highlight/vol02.html>
  17. Severstal. Available at: <https://www.severstal.com/rus/catalogue/metal/severweld>

Поступила 30.09.2020; принята к публикации 02.11.2020; опубликована 25.12.2020  
Submitted 30/09/2020; revised 02/11/2020; published 25/12/2020

**Полецков Павел Петрович** – доктор технических наук, профессор,  
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: [pavel\\_poletskov@mail.ru](mailto:pavel_poletskov@mail.ru)

**Кузнецова Алла Сергеевна** – младший научный сотрудник,  
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: [allakuznetsova@mail.ru](mailto:allakuznetsova@mail.ru)

**Алексеев Даниил Юрьевич** – аспирант,  
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: [D.U.Alekseev@mail.ru](mailto:D.U.Alekseev@mail.ru)

**Никитенко Ольга Александровна** – кандидат технических наук, научный сотрудник,  
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: [olganikitenko@list.ru](mailto:olganikitenko@list.ru)

**Лопатина Екатерина Витальевна** – магистр,  
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: [lopatina.yekaterina2016@yandex.ru](mailto:lopatina.yekaterina2016@yandex.ru)

**Pavel P. Poletskov** – DrSc (Eng.), Professor,  
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: [pavel\\_poletskov@mail.ru](mailto:pavel_poletskov@mail.ru)

**Alla S. Kuznetsova** – Junior Research Associate,  
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: [allakuznetsova@mail.ru](mailto:allakuznetsova@mail.ru)

**Daniil Yu. Alekseev** – postgraduate student,  
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: [D.U.Alekseev@mail.ru](mailto:D.U.Alekseev@mail.ru)

**Olga A. Nikitenko** – PhD (Eng.), Research Associate,  
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: [olganikitenko@list.ru](mailto:olganikitenko@list.ru)

**Ekaterina V. Lopatina** – master,  
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: [lopatina.yekaterina2016@yandex.ru](mailto:lopatina.yekaterina2016@yandex.ru)



# ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

## MATERIAL PROCESS ENGINEERING

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.92

DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-4-39-47



## МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ЦИКЛОВ КРУГЛОГО ВРЕЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ

Дегтярева-Кашутина А.С.<sup>1</sup>, Дьяконов А.А.<sup>2</sup><sup>1</sup> Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия<sup>2</sup> Снежинский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, Снежинск, Россия

**Аннотация.** Обеспечение высокого качества изделий и эффективного производства предполагает использование современного прогрессивного оборудования. Особенно важна точность чистовой механической обработки резанием, ярким представителем которой является операция шлифования. Шлифование является одним из основных способов финишной обработки закаленных деталей. При этом значимая доля операций шлифования приходится на круглое врезное шлифование. Производительность обработки на станках зависит от режимов резания, назначаемых исходя из марки материала заготовки и требований к точности готовой детали. Вместе со сменой старых станков на новые возникает необходимость пересмотра и нормативной базы. Поэтому разработка новой автоматизированной, высокоэффективной методики расчета циклов круглого шлифования является актуальной задачей для современного машиностроения. Для разработки новой методики проведен анализ текущей ситуации, определены основные ограничения, накладываемые на радиальную подачу, разработаны математические модели для реализации данных ограничений. Разработанная методика проектирования высокоэффективных циклов круглого врезного шлифования позволяет определить рациональное количество ступеней цикла и соответствующие им режимы резания. При проектировании цикла шлифования учитываются материал и размер обрабатываемой поверхности детали, предъявляемые к ней требования, характеристики шлифовального круга и станка. Применение данной методики позволяет производить обработку на максимально производительных режимах резания, обеспечивая выполнение заданных технологических ограничений. Циклы, рассчитанные по разработанной методике, на 30% эффективнее, чем рассчитанные по общемашиностроительным нормативам. В дальнейшем данная методика проектирования циклов станет основой для разработки программного модуля проектирования циклов круглого врезного шлифования для станков с ЧПУ.

**Ключевые слова:** шлифование, циклы обработки, методика проектирования.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант № FENU-2020-0020).*

© Дегтярева-Кашутина А.С., Дьяконов А.А., 2020

### Для цитирования

Дегтярева-Кашутина А.С., Дьяконов А.А. Методика проектирования высокоэффективных циклов круглого врезного шлифования // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №4. С. 39–47. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-4-39-47>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

## METHOD OF DESIGNING HIGHLY EFFICIENT CYCLES OF CYLINDRICAL PLUNGE GRINDING

Degtyareva-Kashutina A.S.<sup>1</sup>, Dyakonov A.A.<sup>2</sup><sup>1</sup> South Ural State University, Chelyabinsk, Russia<sup>2</sup> Snezhinsk Institute of Physics and Technology, National Research Nuclear University MEPhI, Snezhinsk, Russia

**Abstract.** Ensuring a high quality of products and efficient production involves the use of modern, advanced equipment. This is of particular importance for precision of finishing machining, prominently represented by a grinding operation. Grinding is a main method of finishing of hardened parts. A significant share of grinding operations are cylindrical plunge grinding. Machining performance depends on the cutting conditions set depending on the steel grade of the workpiece and the requirements for accuracy of the finished part. Replacing old machines with new ones leads to the need to revise the regulatory documents. Therefore, the development of a new automated, highly efficient method for calculating cylindrical grinding cycles is more urgent than ever for the machine building industry. To develop a new method, the authors analyzed the current situation, determined the main limitations due to the radial feed, and developed the mathematical models to implement these limitations. The developed method of designing high-performance cylindrical plunge grinding cycles makes it possible to determine a reasonable number of cycle stages and relevant modes. When designing a grinding cycle, the following parameters are taken into account: material and size of the machined workpiece surface, surface requirements, characteristics of the grinding wheel and the machine. This method contributes to machining at the highest performance cutting modes, while complying with the set process limitations. The cycles calculated according to the developed method are 30% more efficient than those calculated according to general machine-building standards. In the future, this method of designing cycles will become the basis for developing a software module for designing cylindrical plunge grinding cycles on CNC machines.

**Keywords:** grinding, machining cycles, method of designing.

*The research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (grant No.FENU-2020-0020).*

**For citation**

Degtyareva-Kashutina A.S., Dyakonov A.A. Method of Designing Highly Efficient Cycles of Cylindrical Plunge Grinding. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Novos Magnitogorsk State Technical University]. 2020, vol. 18, no. 4, pp. 39–47. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-4-39-47>

**Введение**

Одним из распространенных видов финишной механической обработки является шлифование, которое позволяет обрабатывать заготовки с высокой твердостью поверхностного слоя. Примерно половина всей обработки шлифованием приходится на круглое врезное. Для повышения производительности данного вида операций используются разные приёмы, один из них – циклы обработки. В настоящее время существует три метода проектирования циклов обработки: по нормативам и справочникам режимов врезания; с помощью встроенных в СЧПУ подпрограмм; используя аналитические методы.

В производственных условиях для расчетов режимов резания на станках с ЧПУ чаще всего применяют справочники и нормативы времени и режимов резания. Данные общемашиностроительные нормативы [1] имеют ряд допущений. Во-первых, корректирование нормативных значений под конкретное производство производится за счет

эмпирических коэффициентов. Во-вторых, рассчитываемый в нормативах цикл обработки является двухступенчатым, что не всегда эффективно. Справочник «Абразивная обработка» [2] позволяет спроектировать пятиступенчатый цикл обработки, при этом размер последующей подачи в процентном соотношении зависит от предыдущей. Из чего можно сделать вывод, что назначенные режимы резания не всегда позволят произвести обработку с заданной производительностью при обеспечении качества.

Помимо повышения точности и скорости обработки, неоспоримым преимуществом станков с ЧПУ перед универсальными является наличие системы программного управления и встроенных в неё технологических подпрограмм, которые позволяют в автоматическом режиме создавать цикл для определенного вида обработки. Существенным недостатком данного метода является принцип «черного ящика», то есть неизвестно, по каким параметрам производится расчет режимов резания, следовательно, скорость

обработки и отсутствие брака продолжают зависеть от опыта наладчика станка.

Последний способ разработки эффективных циклов обработки шлифование – это аналитический метод, основанный на математических моделях.

Основой раздела общемашиностроительных нормативов режимов резания [1], посвященного операции круглого врезного шлифования, стала методика П.П. Переверзева [3], основанная на поиске наикратчайшего цикла из возможных, с помощью метода динамического программирования. Предложенная методика позволяет производить оптимизацию циклов шлифования с учетом обеспечения точности и бесприжоговости обработки, обеспечения требуемой шероховатости поверхности детали, а также осыпаемости шлифовального круга. Однако автором не учитываются изменения параметров в процессе обработки, например, температура считается без учета принципа наследования температур и изменения физических свойств обрабатываемого материала.

Следующим этапом развития метода динамического программирования (МДП) стала реализация цифрового двойника [4, 5]. Концепция цифрового двойника служит для виртуального тестирования цикла, рассчитанного МДП, с целью уточнения переменных факторов процесса, а именно износа шлифовального круга, жесткости систем станка, твердости детали и т.п. Если результат проверки неудовлетворительный, цикл дорабатывается. Существенным недостатком метода динамического программирования является его сложность реализации и необходимость иметь большой объем данных, полученных эмпирическим путем.

А.Х. Нуркенов [6] исследовал жесткость технологической системы круглошлифовальных станков и её влияние на производительность обработки. Автором разработана методика определения количества ступеней цикла обработки, исходя из жесткости технологической системы. При разработке цикла обработки учитывается ряд ограничений: по качеству обрабатываемой поверхности, включающее отсутствие прижогов и выполнение требований по шероховатости, по осыпаемости шлифовального круга и по величине упругих деформаций. Автор использует упрощенные зависимости для расчета температуры в зоне резания.

С.W. Lee [7] на основе динамических связей между параметрами процесса разработана нелинейная математическая модель пространства состояний. Данная модель позволяет анализиро-

вать и оптимизировать имеющиеся циклы обработки с помощью датчиков, установленных на станке. Применение данной модели требует дополнительного оснащения станка, что сокращает область и возможности её применения.

В статье N. Shen [8] оптимизация двухступенчатого цикла врезного шлифования, состоящего из черновой и чистовой стадии, производится улучшенным методом дифференциальной эволюции. В качестве лимитирующих параметров для каждой стадии рассматриваются четыре ограничения: бесприжоговость обработки, износ круга, требование по жесткости системы (для черновой стадии) либо производительность (для чистовой стадии). В ходе исследования установлено, что, несмотря на увеличение количества расчетов, предложенное авторами решение позволяет повысить производительность и качество обработки, особенно на черновой стадии. Однако данная методика не универсальна и требует доработки.

В работе Ch. Guo [9] представлены модели для расчета промежуточных и установившихся температур при прерывистом шлифовании. Разработанные модели используют для разработки новых циклов шлифования с переменной рабочей скоростью для увеличения скорости съема материала при сохранении температуры ниже предела возникновения температурных деформаций. В статье R. Dražumetič [10] основным ограничением для формирования цикла шлифования коленчатых валов является бесприжоговость обработки и повышение производительности. В обеих статьях используются эмпирические данные, что сокращает область их применения.

Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что необходим алгоритм разработки циклов обработки шлифованием, учитывающий основные факторы, влияющие на качество и производительность обработки. К основным факторам относятся: обеспечение бесприжоговости обработки, составляющие силы резания, шероховатость обрабатываемой поверхности.

### Полученные результаты и их обсуждение

Перед разработкой методики необходимо определиться, какие данные будут исходными, а какие будут рассчитываться в зависимости от заданных требований. В качестве исходных данных примем: параметры детали; параметры шлифовального круга; параметры станка; режимы резания – частоту вращения детали, скорость вращения круга, шаг изменения подачи при расчете цикла; дополнительные параметры – количество участков по углу и радиусу.

Рассчитываться в процессе будут: припуск на обработку; количество ступеней цикла; радиальная подача на каждой ступени цикла; момент переключения подачи – время и/или снятый припуск.

Первым этапом необходимо определить ряд учитываемых ограничений на радиальную подачу шлифовального круга.

На этапе задания исходных данных реализуется первое ограничение по паспортным данным станка, а именно по мощности, максимальной радиальной подаче и диапазону её изменения:

$$S_{\min} \leq S_i \leq S_{\max}, \quad (1)$$

где  $S_{\min}$  и  $S_{\max}$  – минимальная и максимальная радиальная подача по паспорту станка соответственно, мм/мин;  $S_i$  – радиальная подача на  $i$ -й ступени цикла, мм/мин.

Процесс шлифования от других процессов механической обработки отличает высокая скорость и интенсивное тепловыделение, что в совокупности с предварительной закалкой заготовок приводит к сложности описания физических явлений, происходящих в зоне контакта шлифовального круга и заготовки. Резкие перепады температур могут привести к образованию вторично закаленного и вторично отпущенного слоёв. Для предотвращения структурных изменений вводится второе ограничение по неприжоговости обработки. Для реализации данного ограничения необходимо разработать математическую модель для определения текущей температуры, которая будет сравниваться с максимально допустимой:

$$U_n - U_{\max, \text{доп}} < 0, \quad (2)$$

где  $U_n$  – текущее значение температуры;  $U_{\max, \text{доп}}$  – максимально допустимое значение температуры, задаваемое в зависимости от марки стали.

Для расчета температуры в зоне контакта заготовки и шлифовального круга запишем уравнение теплопроводности в полярных координатах:

$$c \frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{\lambda \partial U}{r \partial r} + \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \frac{\lambda \partial U}{r^2 \partial \varphi} \right), \quad (3)$$

где  $r$  – текущий радиус, м;  $\varphi$  – текущий угол;  $t$  – время, с;  $U$  – температура, °С;  $c$  – теплоемкость, Дж/м<sup>3</sup>·°С;  $\lambda$  – теплопроводность, Дж/м·с·°С.

Краевые условия на пятне контакте (при  $r=R$ )

$$\lambda \frac{\partial u}{\partial r} = Q, \quad (4)$$

где  $Q$  – мощность теплового источника, Дж/м<sup>2</sup>·с.

Краевые условия вне пятна контакта (при  $r=R$ )

$$\lambda \frac{\partial u}{\partial r} = \alpha (T - U), \quad (5)$$

где  $T$  – температура окружающей среды, °С;  $\alpha$  – теплоотдача на границе, Дж/м<sup>2</sup>·°С·с.

Мощность теплового источника рассчитывается по формуле, предложенной в работе С.Н. Корчака [11], которая учитывает тепловыделение от пластического сдвига и трения о вершину абразивного зерна металла:

$$Q = q_{\text{ср}} = \frac{0,8649 \sigma_i v_k \cdot (1,5a + 0,017l_3)}{0,56a + 0,17l_3}, \quad (6)$$

где  $\sigma_i$  – интенсивность сопротивления материала деформации, Дж/м;  $v_k$  – скорость вращения круга, м/с;  $l_3$  – величина площадки затупления зерна, м,  $l_3 = 0,1$  мм;  $a$  – толщина среза, м.

Третьим является ограничение по геометрической точности обработки, которая задается на чертеже детали следующими показателями: допуском на диаметральный размер и допусками формы и расположения поверхностей, когда они меньше допуска на размер.

Величина радиальной составляющей силы резания  $P_y$  оказывает влияние на отжимы в технологической системе, которые приводят к неравномерному снятию припуска с поверхности заготовки, и как следствие погрешностям формы. В ряде работ [3, 11] установлено, что для обеспечения требуемой точности радиальная составляющая силы резания не должна превышать предельного значения, рассчитываемого исходя из жесткости технологической системы, материала обрабатываемой поверхности, требуемой точности, характеристик режущего инструмента. В.И. Ключко [12] установлено, что при обеспечении одних требований к обрабатываемой поверхности в пределах одной группы сталей по обрабатываемости колебание  $P_z$ , а следовательно, и  $P_y$ , незначительное.

Из описанного выше можно сделать вывод, что помимо ограничения верхней границы радиальной составляющей силы резания при проектировании цикла шлифования, необходимо обеспечивать её постоянство в пределах 10%:

$$\begin{cases} P_y \leq P_{y \text{ пред}}; \\ P_{yi} \cong P_{yi+1} \cong \dots \cong P_{yn}. \end{cases} \quad (7)$$



Разрабатываемая математическая модель радиальной составляющей силы резания основывается на формуле, предложенной С.Н. Корчаком [11]:

$$P_{yi} = (2,311a + 0,289l_3) \sigma_i, \quad (8)$$

где  $a$  – толщина среза, мм.

Подобным образом проходит проверка по последнему параметру – качеству поверхностного слоя обрабатываемой детали, а именно шероховатости, поскольку отсутствие прижога учтено в первом ограничении. Данное ограничение применяется к последним ступеням цикла, на которых производится процесс «выхаживания». Требование к шероховатости обрабатываемой поверхности является исходным данным, и при расчетах принимается как предельное значение шероховатости:

$$Ra_i \leq Ra. \quad (9)$$

Для обеспечения требуемой шероховатости поверхности воспользуемся моделью, предложенной Л.В. Шипулиным [13]. Как отмечает сам автор, из-за малого размера длины дуги контакта изгибом можно пренебречь и применить те же принципы, что и для плоского шлифования. Микрорельеф на новом обороте формируется с учетом предыдущего. Расчет среднеарифметического отклонения профиля производится по формуле [13]:

$$Ra = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (h_{i,j}^k - h_i), j \in l_{\text{баз}}. \quad (10)$$

Таким образом, сформированы основные ограничения, накладываемые на величину радиальной подачи в процессе проектирования цикла шлифования. Поскольку не все ограничения применяются от начала и до конца цикла, ниже рассмотрим методику проектирования подробнее.

Рассмотрим алгоритм проектирования цикла на абстрактном примере. Как выше указывалось, ограничение по мощности задано в исходных данных, значит, первое ограничение, которое необходимо проверить на этапе проектирования цикла – это ограничение по бесприжогости.

Расчет температуры и других параметров производится при каждом повороте на угол  $\varphi$ , значение угла зависит от исходных данных, а именно количества участков по углу (рис. 1).

Расчет начинается с максимальной подачи  $S_{\text{max}}$ , заданной в исходных данных, для максимальной производительности. При превышении максимально допустимой температуры на участке  $\varphi_i$  производится возврат на участок  $\varphi_{i-1}$  и снижение радиальной подачи на один шаг  $\Delta S_{\text{рад}}$ . Условно это можно представить графиком, приведенным на рис. 2. Если однократное снижение подачи не предотвратило появление прижога или температура снизилась на менее 10% от максимально допустимой, то снижение подачи производится повторно на том же участке  $\varphi_{i-1}$ .

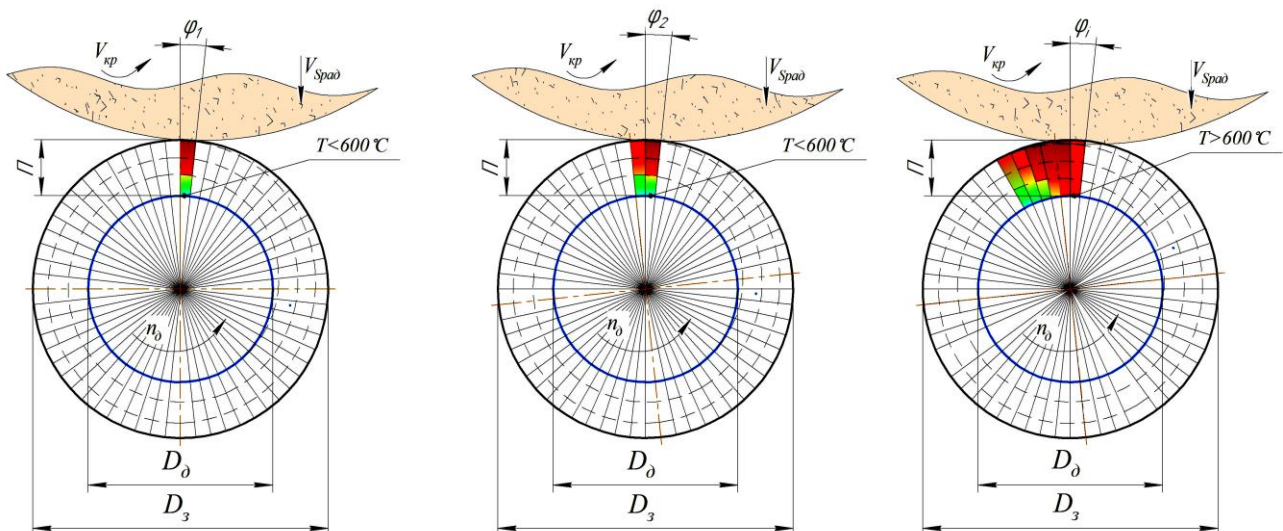


Рис. 1. Последовательность расчетов температуры при шестидесяти участках по углу  
Fig. 1. Sequence of temperature calculations for sixty sections by angle



Параллельно с бесприжоговостью проверяется ограничение по точности обработки. Увеличение температуры обрабатываемого материала приводит к снижению сопротивления деформации и, как следствие, снижению силы резания. В момент резания, когда температура максимальна, сила резания минимальна, а при снижении температуры сила резания начинает увеличиваться. Если радиальная составляющая силы резания превышает предельное значение, то подача снижается по такому же алгоритму, что и в случае с температурой. Так же производится проверка второго условия – принципа единой радиальной нагрузки.

На последних ступенях цикла, когда припуск остается менее 0,1 мм, на подачу помимо первых двух накладывается ограничение по шероховатости обрабатываемой поверхности.

В итоге на черновой стадии цикла выбор рациональной подачи производится по трем критериям: мощности станка, бесприжоговости и точ-

ности обработки, а на чистовой мощность станка уже не является лимитирующим параметром и её место занимает шероховатость (рис. 3). Красными линиями показаны изначальная подача, при которой происходит превышение ограничения по температуре, а зелеными – корректировка с учетом всех ограничений, штриховкой показана область допустимых значений.

Для условий обработки: диаметр детали – 60 мм, частота вращения – 145 об/мин; диаметр шлифовального круга – 600 мм, скорость – 50 м/с, рассчитан цикл по разработанной методике (рис. 4) и по общемашиностроительным нормативам [1] (рис. 5). Как видно из графиков, максимальное время обработки по методике для детали из стали 30ХГСНА составляет 67,7 с, по нормативам для этой же детали время цикла – 115 с. Следовательно, применение методики сокращает время цикла более чем в 1,5 раза.

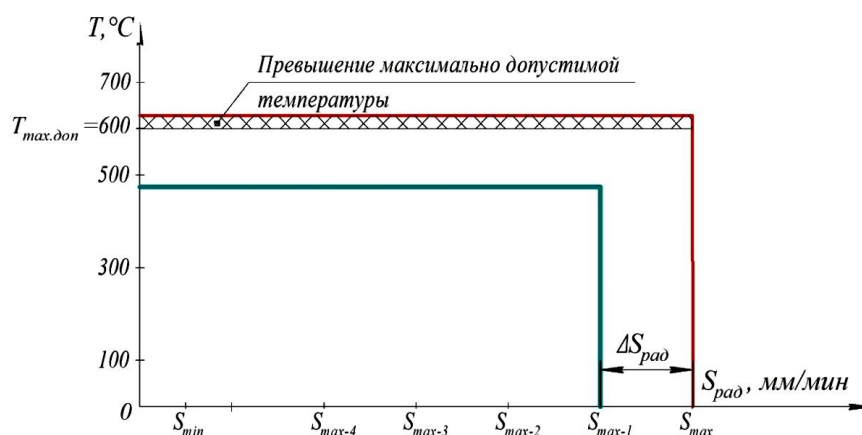


Рис. 2. Снижение радиальной подачи при повышении максимально допустимой температуры  
Fig. 2. Reduction of the radial feed with increasing maximum allowable temperature

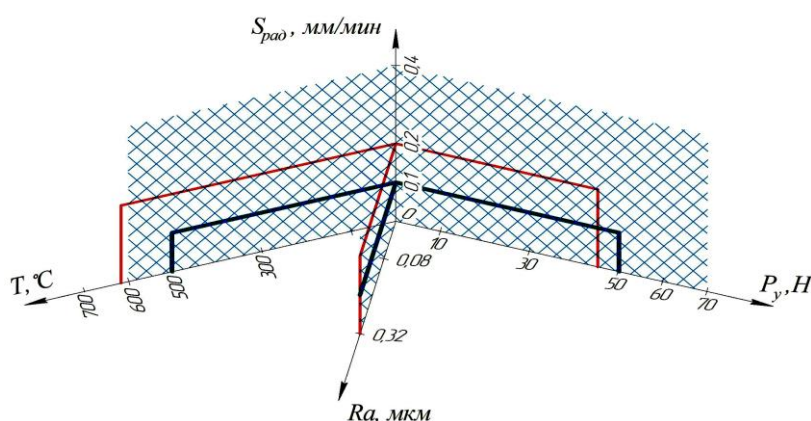


Рис. 3. Определение рациональной подачи на чистовой стадии  
Fig. 3. Determination of the reasonable feed at the finishing stage

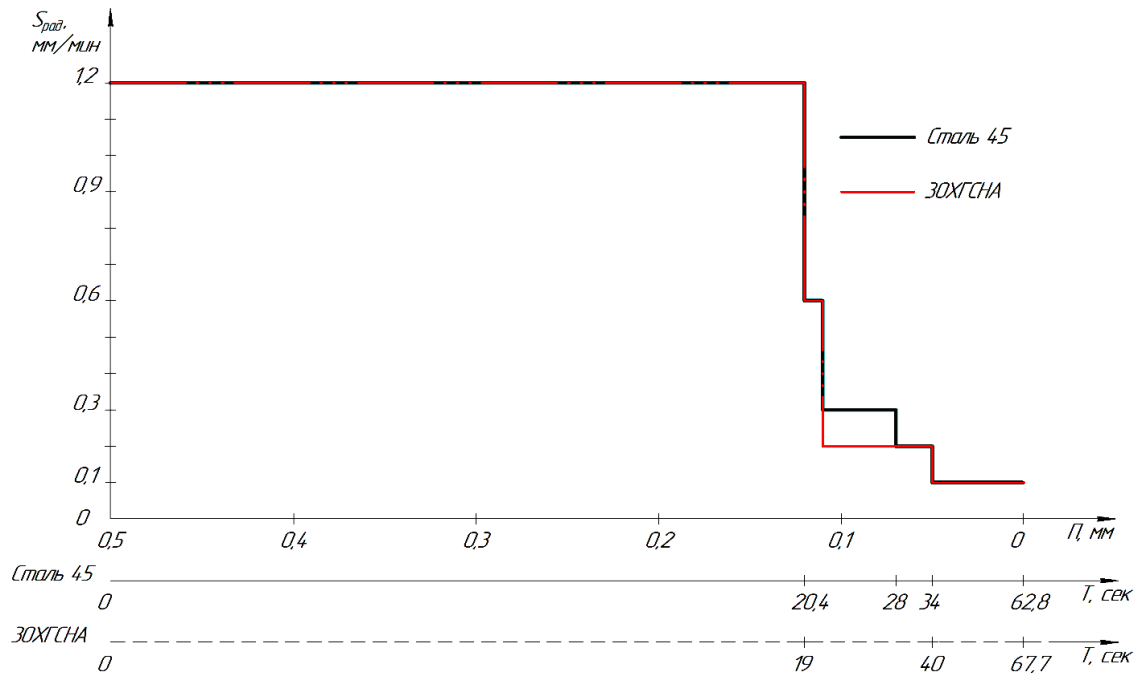


Рис. 4. Цикл обработки, рассчитанный по предлагаемой методике  
Fig. 4. The machining cycle calculated by the suggested method

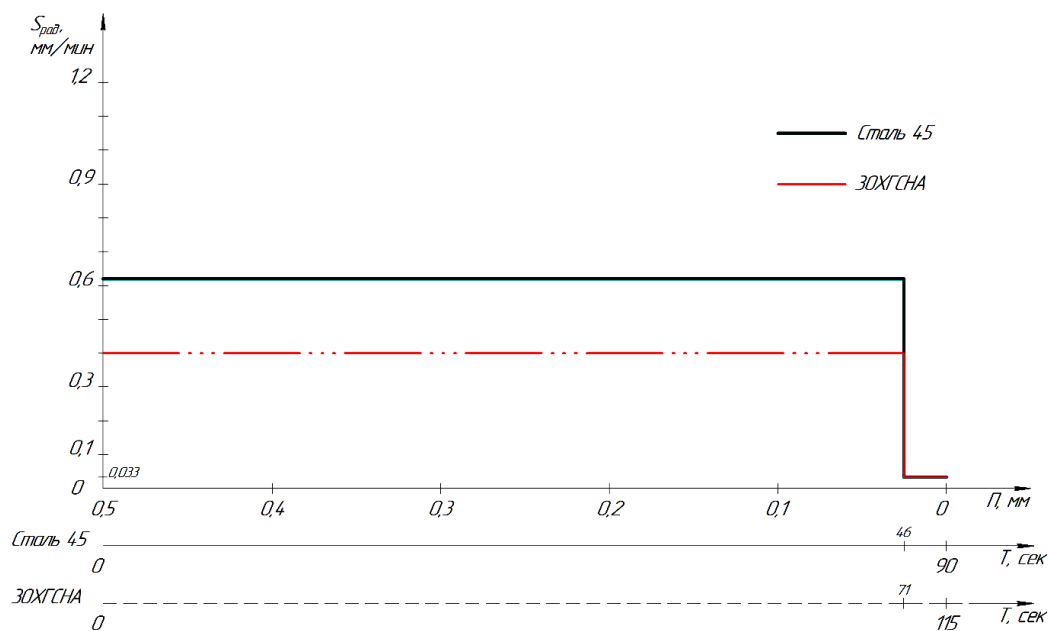


Рис. 5. Цикл обработки, рассчитанный по общемашиностроительным нормативам  
Fig. 5. The machining cycle calculated by general machine-building standards

### Заклучение

Разработана методика проектирования высокоэффективных циклов для операций круглого врезного шлифования, которая в автоматическом

режиме определяет количество ступеней цикла, исходя из материала заготовки и предъявляемых к ней требований, а также характеристик инструмента и станка.

## Список литературы

1. Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания для нормирования работ, выполняемых на универсальных и многоцелевых станках с числовым программным управлением: справочник / П.П. Переверзев [и др.]. М.: Экономика, 1990. 394 с.
2. Вереина Л.И., Краснов М.М., Фрадкин Е.И. Абразивная обработка: справочник / под общ. ред. Л.И. Вереиной. М.: ИНФРА-М, 2017. 304 с.
3. Переверзев П.П. Теория и методика расчета оптимальных циклов обработки деталей на круглошлифовальных станках с программным управлением: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.08/ Павел Петрович Переверзев. Челябинск, 1999. 36 с
4. Pereverzev P.P., Akintseva A.V. Modeling of metal removal during an internal grinding in view of kinematics cutting features // Russian Engineering Research. 2016. Vol. 36. No. 10. P.888–893.
5. Переверзев П.П., Акинцева А.В., Алсигар М.К. Применение цифрового двойника при прогнозировании надежности управляющих программ для станков с ЧПУ // Инновации в машиностроении. 2018. С. 228–232.
6. Нуркенов А.Х. Проектирование многоступенчатых циклов круглого врезного шлифования для станков с ЧПУ // Научно-технические технологии на современном этапе развития машиностроения. 2016. С. 151–153.
7. Lee C.W. A control-Oriented Model for the Cylindrical Grinding Process // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2009. Vol. 44. No. 7–8. P. 657–666.
8. An Improved Differential Evolution (IDE) Based on Double Populations for Cylindrical Grinding Optimization/ Nanyan Shen; Yongyi He; Jing Li; Minglun Fang// 2009 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, IEEE Xplore. 2009. Number: 10835217. DOI: 10.1109/ICMTMA.2009.370
9. Changsheng Guo, Yan Chen. Thermal modeling and optimization of interrupted grinding // CIRP Annals. 2018. Vol. 67, Iss. 1. P. 321–324. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.083>
10. Temperature-based method for determination of feed increments in crankshaft grinding/ Radovan Dražumerić, Roope Roininen, Jeffrey Badger, Peter Krajnik// Journal of Materials Processing Technology. 2018. Vol. 259. P. 228–234.
11. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. М., Машиностроение, 1974. 280 с.
12. Ключко В.И. Эффективность высокоскоростного шлифования разных сталей и сплавов с учетом точности и качества обработки: дис. ... канд. техн. наук / Ключко Валентин Иванович. Челябинск, 1984. 207 с.
13. Shipulin L.V., D'yakonov A.A. Imitation model of forecasting surface relief when forming it during cylindrical grinding // Procedia Engineering. 2016. С. 936–941.

## References

1. Pereverzev P.P. et al. *Obshchemashinostroitelnye normativy vremeni i rezhimov rezaniya dlya normirovaniya rabot, vypolnyayemykh na universalnykh i mnogotsel'nykh stankakh s chislovyim programmnyim upravleniyem: spravochnik*. [General machine-building standards for time and cutting modes for standardizing work performed on universal and multi-purpose computer numerical control machines: a reference book]. Moscow: Economics, 1990, 394 p. (In Russ.)
2. Vereina L.I., Krasnov M.M., Fradkin E.I. *Abrazivnaya obrabotka: spravochnik* [Abrasive processing: a handbook] Moscow: INFRA-M, 2017, 304 p. (In Russ.)
3. Pereverzev P.P. *Teoriya i metodika rascheta optimalnykh tsiklov obrabotki detaley na krugloshlifovalnykh stankakh s programmnyim upravleniyem: avtoreferat dis. dokt. tekhn. nauk* [Theory and methodology for calculating the optimal processing cycles of parts on computer controlled circular grinding machines: Extended abstract of the doctoral thesis]. Chelyabinsk, 1999, 36 p.
4. Pereverzev P.P., Akintseva A.V. Modeling of metal removal during an internal grinding in view of kinematics cutting features. Russian Engineering Research 36, 10, 888–893 (2016).
5. Pereverzev P.P., Akintseva A.V., Alsigar M.K. Application of the digital twin in predicting the reliability of control programs for CNC machines. *Innovatsii v mashinostroyeni* [Innovations in Mechanical Engineering], 2018, pp. 228–232. (In Russ.)
6. Nurkenov A.Kh. Design of multi-stage cylindrical plunge grinding cycles for CNC machines. *Naukoemkie tekhnologii na sovremennom etape razvitiya mashinostroyeniya* [Science-intensive technologies at the present stage of mechanical engineering development], 2016, pp. 151–153. (In Russ.)
7. Lee C.W. A control-oriented model for the cylindrical grinding process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 44, 7–8, 657–666 (2009).
8. Shen Nanyan, He Yongyi, Li Jing, Fang Minglun. An improved differential evolution (IDE) based on double populations for cylindrical grinding optimization. 2009 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, IEEE Xplore, 10835217 (2009) DOI: 10.1109/ICMTMA.2009.370
9. Changsheng Guo, Yan Chen. Thermal modeling and optimization of interrupted grinding. CIRP Annals. 67, 1, 321–324 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.083>
10. Radovan Dražumerić, Roope Roininen, Jeffrey Badger, Peter Krajnik. Temperature-based method for determination of feed increments in crankshaft grinding. Journal of Materials Processing Technology, 259, 228–234 (2018).
11. Korchak S.N. *Proizvoditelnost protsessy shlifovaniya stalnykh detaley* [Steel parts grinding performance]. Moscow: Mechanical Engineering, 1974, 280 p. (In Russ.)

12. Klochko V.I. *Effektivnost vysokoskorostnogo shlifovaniya raznykh staley i spлавov s uchetom tochnosti i kachestva obrabotki: dis. ... kand. tekhn. nauk* [The efficiency of high-speed grinding of different steels and alloys, taking into account the accuracy and quality of processing: Ph.D. dissertation]. Chelyabinsk, 1984, 207 p.
13. Shipulin L.V., D'yakonov A.A. Imitation model of forecasting surface relief when forming it during cylindrical grinding. *Procedia Engineering*, 936–941 (2016).

Поступила 27.08.2020; принята к публикации 15.10.2020; опубликована 25.12.2020  
Submitted 27/08/2020; revised 15/10/2020; published 25/12/2020

**Дегтярева-Кашутина Анастасия Сергеевна** – старший преподаватель  
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.  
Email: asdegyareva24@gmail.com. ORCID 0000-0002-4236-9207

**Дьяконов Александр Анатольевич** – доктор технических наук, доцент  
Снежинский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, Снежинск, Россия.  
Email: sigma-80@mail.ru. ORCID 0000-0001-8384-6359

**Anastasiya S. Degtyareva-Kashutina** – Senior Teacher  
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.  
Email: asdegyareva24@gmail.com. ORCID 0000-0002-4236-9207

**Alexander A. Dyakonov** – DrSc (Eng.), Associate Professor  
Snezhinsk Institute of Physics and Technology,  
National Research Nuclear University MEPhI, Snezhinsk, Russia.  
Email: sigma-80@mail.ru. ORCID 0000-0001-8384-6359

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)  
УДК 65.06+65.011.5+65.011.8+65.011.42  
DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-4-48-56



## МОДЕРНИЗАЦИЯ СТАНКОВ С ЧПУ НА ПРЕДПРИЯТИИ ОПК

Антонов А.Ю., Данилаев Д.П.

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия

**Аннотация. Актуальность.** Модернизация производства является одним из приоритетных направлений развития предприятий. Техническое перевооружение предприятий возможно либо путем замены оборудования, либо модернизацией станочного парка. При этом существуют различные варианты модернизации, например станков с ЧПУ. Каждый вариант имеет положительные и отрицательные стороны. Организация модернизации станков с ЧПУ на предприятиях ОПК сопряжена не только с выбором одного из вариантов, но и с дополнительными сложностями, такими как соблюдение технологий, импортозамещения, требований к выполнению гособоронзаказа и др. Причем модернизация станков с ЧПУ может преследовать различные цели и решать разные задачи. Цель работы – анализ условий организации модернизации станков с ЧПУ на предприятиях ОПК, задач и характерных проблем модернизации станков с ЧПУ на оборонном предприятии, а также определение путей ее реализации. **Материалы и методы.** Основой исследования стал панорамный подход к обсуждаемым проблемам, задачам и вариантам модернизации станков с ЧПУ на предприятиях ОПК. Решение об организации модернизации станочного парка предприятия ОПК является комплексным и принимается с учетом внутренних и внешних факторов, а также с учетом вариантов ее проведения. На основе анализа различных видов модернизации станков с ЧПУ на производственных предприятиях ОПК, их достоинств и недостатков приводится обоснование рационального варианта. Анализ основан также на обобщении и структурировании проблем, возникающих при организации модернизации станков с ЧПУ на предприятиях ОПК, а также при вводе их в эксплуатацию. **Результаты и выводы.** Проведенный анализ показывает, что замена электронной части станков с ЧПУ является наиболее целесообразным видом модернизации. Но для станков с ЧПУ разных поколений техническая реализация новых электронных блоков управления должна отличаться. Связано это с сопряжением либо с фазовой, либо с дискретной системой управления устаревших станков. Несмотря на это, модернизированные станки должны интегрироваться в единое технологическое пространство, иметь общий интерфейс, работать по одним алгоритмам. С этих позиций раскрыто понятие единого подхода к модернизации станков с ЧПУ на предприятиях ОПК.

**Ключевые слова:** модернизация станков с ЧПУ, проблемы модернизации станков, виды модернизации станков, автоматизация производства, импортозамещение, модернизация предприятий ОПК.

*Научные исследования проведены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках исполнения обязательств по Соглашению номер 075-03-2020-051/3 от 09.06.2020 (номер темы fzsu-2020-0021).*

© Антонов А.Ю., Данилаев Д.П., 2020

### Для цитирования

Антонов А.Ю., Данилаев Д.П. Модернизация станков с ЧПУ на предприятии ОПК // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №4. С. 48–56. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-4-48-56>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



## MODERNIZATION OF CNC MACHINES IN A DEFENSE ENTERPRISE

Antonov A.Yu., Danilaev D.P.

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia

**Abstract. Relevance.** The modernization of production is one of the priorities for the development of enterprises. Technical upgrading of enterprises is possible either by replacing equipment or by modernizing the machine pool. At the same time, there are various options for the modernization of CNC machines, for instance. Every option has positive and negative aspects. Organizing the modernization of CNC machines in defense enterprises is associated not only with the selection of one of the options, but also with additional difficulties, such as compliance with technologies, import substitution, requirements for the fulfillment of state defense orders, etc. Moreover, the modernization of CNC machines may pursue different goals and solve different problems. The objective of the study is to analyze the conditions for organizing the modernization of CNC machines in defense enterprises, objectives and typical problems of modernizing CNC machines in a defense enterprise, as well as to determine the ways of its implementation. **Materials and methods.** The research is based on a panoramic approach to the discussed problems, objectives and options for modernizing CNC machines in defense enterprises. The decision to organize the modernization of the machine pool of the defense enterprise is integrated, and is made taking into account internal and external factors, as well as the options for its implementation. The rationale for a feasible option is given based on the analysis of various types of the modernization of CNC machines at manufacturing plants of the military-industrial complex, their advantages and disadvantages. The analysis is also based on the generalization and structuring of the problems arising during the organization of the modernization of CNC machines at the enterprises of the defense industry, as well as during their commissioning. **Results and Conclusions.** The analysis shows that the replacement of an electronic part of CNC machines is the most feasible type of modernization. But as for CNC machines of different generations, the technical implementation of new electronic control units should be different. This is due to the interface with either a phase or discrete control system of outdated machines. Despite this, the modernized machines are to be integrated into a single technological space, have a common interface, and work according to the same algorithms. The concept of a unified approach to the modernization of CNC machines in defense enterprises is defined from these positions.

**Keywords:** modernization of CNC machines, problems of modernization of machines, types of modernization of machines, production automation, import substitution, modernization of defense enterprises.

*The research was funded by the Ministry of Education and Science of Russia as part of performance of the obligations under Agreement 075-03-2020-051/3 dated 09.06.2020 (subject no. fzs-2020-0021).*

### For citation

Antonov A.Yu., Danilaev D.P. Modernization of CNC Machines in a Defense Enterprise. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020, vol. 18, no. 4, pp. 48–56. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-4-48-56>

### Введение

Тема модернизации станков всегда остается актуальной как мероприятия технического перевооружения любых предприятий с целью их устойчивого развития, повышения их эффективности [1, 2]. На крупных промышленных предприятиях модернизация решает проблему морально устаревшего и физически изношенного станочного парка, а также направлена на внедрение новых технологий, в том числе информационных технологий контроля и управления. На небольших предприятиях модернизация направлена на расширение функциональных возможностей, обеспечение конкурентоспособности и т.д. В каждом случае организация и проведение технологической модернизации имеет свои варианты и особенности. Каждый вариант имеет положительные и отрицательные стороны. Организа-

ция модернизации станков с ЧПУ на предприятиях ОПК сопряжена не только с выбором одного из вариантов, но и с дополнительными сложностями, такими как соблюдение технологий, импортозамещения, требований к выполнению гособоронзаказа и др. Причем модернизация станков с ЧПУ может преследовать различные цели и решать разные задачи. Цель работы – анализ условий организации модернизации станков с ЧПУ на предприятиях ОПК, задач и характерных проблем модернизации станков с ЧПУ на оборонном предприятии, а также определение путей ее реализации.

### Цели и задачи модернизации станочного парка на предприятиях ОПК

Модернизация производства относится к приоритетным направлениям развития предпри-

ятий ОПК, определенным в ежегодных посланиях Президента РФ Федеральному Собранию, а также в перечне поручений Президента РФ [3]. В соответствии со стратегическими приоритетами определяются и цели модернизации: формирование потенциала для научно-технологического и инновационного развития, повышение эффективности использования основных производственных фондов, повышение производительности труда, развитие производств товаров гражданского и двойного назначения, реализация программы импортозамещения. Кроме этого, предприятия стоят перед необходимостью обеспечить резерв производственных мощностей для сохранения оборонно-промышленного потенциала страны [4]. При этом для достижения основной цели – выполнения гособоронзаказа в срок – предприятие должно решить две главные задачи: быть укомплектованным необходимым оборудованием, ресурсами и специалистами и рационально планировать и управлять производственным процессом [5].

Мероприятия по технологической модернизации (техническому перевооружению) предприятий направлены на расширение их функциональных возможностей, повышение их надежности, снижение производственных издержек, рост производительности труда и значительное повышение качества выпускаемой продукции. Эти мероприятия предусматривают внедрение ресурсосберегающих технологий, развитие промышленных базовых и критических технологий в обеспечение современного научно-технического и производственного потенциала, создание центров компетенций и специализированных производств [1, 6].

### **Условия принятия решений о модернизации станков на предприятиях ОПК**

Замена имеющихся станков на точно такие новые нецелесообразна (из-за их морального старения) и невозможна (их просто уже нет). Для проведения реконструкции и технического перевооружения производственно-технологической базы возможно два варианта: закупка нового оборудования с заменой устаревших станков и восстановительный ремонт с модернизацией существующего оборудования. Проблемы первого варианта известны: «на базе этих старых станков используются уникальные технологии, которые с успехом работают на многих заводах. При замене старого оборудования на новое, купленное в других странах, придётся забыть про свои технологии и разработать или приобрести новые. Всё это новые капитальные затраты, которые

требуют серьезных финансовых вливаний» [7].

Любое предприятие, так или иначе, занимается модернизацией станочного парка. При принятии решения каждое из них исходит из имеющихся возможностей и складывающейся необходимости.

Но именно предприятия ОПК находятся в наиболее жестких условиях. Поэтому для них существуют дополнительные аргументы в пользу ремонта и модернизации существующих станков с ЧПУ, появляющиеся исходя из условий организации производственной деятельности и рисков инноваций. Среди них:

- тенденция разумного импортозамещения как долгосрочного приоритета страны [3];
- действующим законодательством (например, 275-ФЗ) при гособоронзаказе установлен запрет приобретения оборудования иностранного производства, в том числе литейных машин, станков (токарных, агрегатных, шлифовальных, металлорежущих и пр.);
- рентабельность инвестиций в модернизацию производства относительно эффективности как отдельного проекта (с учетом особенностей определения цены контракта по гособоронзаказу на основе издержек предприятий и установленных норм прибыли), так и предприятия, реализующего этот проект [2]. Причем государство не берет на себя экономическую ответственность за убытки предприятия в связи с нерациональной организацией производства по гособоронзаказу;
- долгосрочный и капиталоемкий характер инвестиций и самой производственной деятельности [8, 9];
- монополия заказчика, обусловленная преобладанием государственного заказа над инициативными работами предприятия ОПК [9];
- наукоемкость и высокотехнологичность разработки и производства подавляющего большинства продукции [9];
- высокий уровень специализации и монополизации производителей [9];
- особые информационные условия функционирования предприятий, обусловленные требованиями секретности, ограничивающие кооперацию и передачу технологий [9];
- сложность кооперации с соисполнителями гособоронзаказа. Например, отсутствие обязанности участия поставщиков материалов и комплектующих для производства изделий в кооперации по гособоронзаказу; невозможность закупок малых объемов материалов и комплектующих для выполнения отдельных контрактов в рамках гособоронзаказа; сложность расходования денежных средств с отдельных счетов; отсутствие обя-

занности поставщиков материалов и комплектующих ограничивать рост цен на свою продукцию индексами и дефляторами [10]. В связи с чем вынужденно возникает необходимость высокой концентрации производства и обеспечения всех операций по производству изделий без их передачи на аутсорсинг;

- принципы концентрации и специализации (технологической или предметной) положены в основу организации цехов и участков на предприятиях ОПК [11]. В частности, они приводят к высокой загрузке оборудования, что усложняет вывод оборудования на ремонт и модернизацию. Естественно, возникает вопрос фронтальной модернизации единообразного оборудования участка или цеха;

- необходимость в специальной технологической оснастке целевого назначения, затрат на ее изготовление, ремонт и поддержание в рабочем состоянии [12]. Организация производства продукции по ГОЗ осуществляется на основе серии ГОСТ РВ, в том числе ГОСТ РВ 0015-002-2012 «Система разработки и постановки на производство военной техники. Системы менеджмента качества. Общие требования» [13]. Предусматривается определение технологических операций, режимов и условий их проведения, в наибольшей степени оказывающих влияние на качество и воспроизводимость параметров критичных элементов конструкции продукции, а также разработка системы мониторинга и регулирования этих операций. В том числе должны быть обеспечены контроль, оценка точности настроенности и стабильности техпроцесса;

- необходимость освоения и внедрения инновационных технологий двойного назначения, а также обеспечение производства изделий гражданского назначения, при производстве которых используются усовершенствованные технологии без существенного перевооружения производства [4].

Перечисленные условия в большей степени свидетельствуют в пользу решения о модернизации станков. Однако техническое перевооружение направлено в том числе на переход к выпуску гражданской продукции или продукции двойного назначения и планируется, как правило, в рамках общей концепции развития целых концернов, в состав которого входит предприятие ОПК. В соответствии с перечисленными стратегическими задачами модернизация станков должна привести к расширению их функционала. Поэтому принятие решения о модернизации станков является многокритериальным, непостоянным.

Исходя из этих же условий, осуществляется выбор варианта модернизации станков и способа его реализации.

### Варианты модернизации станков с ЧПУ

Для парка станков с ЧПУ на любом предприятии существуют проблемы морального устаревания и физического износа. Механическая часть станков обладает достаточно большим ресурсом. Многие станки, произведенные в СССР, имеют цельнолитую чугунную станину, которая является основой для всех других частей станка и задаёт ему высокую жесткость [14]. Физический износ можно устранить проведением капитального ремонта, который включает, например, восстановление направляющих, замену деталей шпиндельного узла, ходовой части приводов и т.д. Современное машиностроительное предприятие имеет практически неограниченные возможности по капитальному ремонту и даже улучшению технического состояния механических частей станков, в то время как ремонт электронных блоков с каждым годом становится всё более трудоёмким [15]. Кроме того, если производительность вычислительных систем и ёмкость запоминающих устройств выросли за последние 10 лет на порядки, то размеры рабочих зон, обороты двигателей и точность позиционирования остались практически неизменными.

Основная причина морального износа станков с ЧПУ – устаревание их систем числового программного управления. Среди недостатков устаревших систем ЧПУ можно отметить:

- громоздкость, высокое энергопотребление и низкая надежность систем ЧПУ первого, второго поколений;

- использование устаревших носителей данных. Из-за недостаточно надежной работы считывающего устройства, ненадежности носителей (например, магнитной ленты или перфоленты) нередко возникают сбои в работе оборудования, появляется брак. Повышенная вероятность сбоев, связывается также с покадровым программированием элементарных действий станка;

- устаревшую элементную базу и низкую степень ремонтпригодности;

- сложность и продолжительность подготовки программ на устаревших носителях. Трудности тиражирования программы на несколько носителей и станков с ЧПУ;

- высокую стоимость эксплуатации. Повышенные требования к условиям хранения носителей. Необходимость подготовленного персонала. Причем молодое поколение порой даже не знакомо с подобными видами носителей информации;

- практическую невозможность дистанционного управления устаревшего оборудования с применением локальных сетей и технологий удаленного доступа. Сложность планирования замкнутого производственного цикла для изделия с применением разного оборудования.

Один из самых распространенных вариантов модернизации станков с ЧПУ – это замена устаревшей электронной начинки на современную («минимальная модернизация»). После проведенной модернизации оборудование не уступает по эксплуатационно-техническим характеристикам современному оборудованию, а по надежности и крепости станины может даже превосходить их. После модернизации интерфейс системы более удобен и отвечает современным требованиям, вместо нагромождения всевозможных элементов можно наблюдать аккуратные блоки, занимающие достаточно мало места. Явным преимуществом минимальной модернизации систем за счет совершенствования устройства ЧПУ можно считать сроки их проведения. Не более 2-х дней понадобится для совершенствования станка, минимум простоя – важное условие производственного процесса. Невысокая стоимость – еще одно преимущество данной модернизации [16].

Следующим вариантом модернизации является замена электронной системы и электрооборудования, включая электродвигатели и блоки питания. Такая модернизация направлена на повышение энергетической эффективности. Этот способ сопряжен с вмешательством в механическую часть станка, что может потребовать изменение передаточных отношений приводов подачи. Это создает дополнительные сложности с достижением необходимой точности обработки. В случае же фазовых систем ЧПУ (например, система управления фрезерным станком 6M13ГН1) существующая механическая часть станка имеет систему обратной связи между ведущим двигателем в каждой из координатных осей станка [17]. Поэтому смена электрооборудования часто ведет к пересмотру системы контроля и реализации исполнительных механизмов.

Замену датчиков, обеспечивающих обратную связь, относят к отдельному виду модернизации. Причем данный вид модернизации считается самым дорогостоящим и трудозатратным. Выгода после модернизации не является принципиальной и влечет за собой трудности при обслуживании данного станка [16].

Таким образом, замена электронной части системы ЧПУ станков является наиболее целесообразной и обоснованной. Однако при такой

модернизации следует учитывать некоторые особенности. При включении станков с ЧПУ в одну автоматизированную систему предприятия возникает задача их сопряжения, в том числе идентичности системы управления. Это может касаться как методов формирования управляющей программы, использованной системы команд, так и интерфейса взаимодействия. Существенную роль играет соблюдение единой архитектуры систем ЧПУ [16].

Использование современной электроники позволяет существенно увеличить объем памяти в станках с ЧПУ, обеспечивая загрузку, хранение и выполнение достаточно больших программ управления. Это позволяет повысить точность выполнения операций, стабильность технологического процесса, воспроизводимость его параметров, надежность и производительность оборудования. Современные управляющие программы обеспечивают также расширение функциональных возможностей таких станков. При планировании модернизации и проектировании обновленной системы ЧПУ важно учитывать унифицированные подходы к разработке управляющих программ, а также программные среды проектирования, моделирования и разработки технологических процессов.

При высокой сложности как управляющих программ, так и выполняемого процесса возникает задача контроля. Это может быть достигнуто путем вывода информации о параметрах процесса, а также параметрах обрабатываемого изделия. Следовательно, появляется и новый функционал самой системы ЧПУ. А вид модернизации затрагивает способ вывода и отображения контролируемой информации.

Как правило, даже при применении различной элементной базы используемые интерфейсы остаются неизменными.

Принципиально новой является идеология по интеграции модернизируемых станков в единую сеть, через которую можно контролировать как приоритеты выполнения программ, загружать управляющие программы, так и распределить полномочия управления. Такое решение ведет к современному, более экономичному и эффективному производству. Однако интеграция станков с ЧПУ в ERP-системы, локальные технологические цепи вносит дополнительные сложности. Возникают дополнительные системы ввода технологических программ. В алгоритме работы системы управления станков необходимо определять иерархию системы управления, включая дистан-



ционное управление, приоритеты системы и команд управления, полномочия каждой системы управления, права прерывания процессов и пр.

Проведенный анализ показывает, что замена электронной части станков с ЧПУ является наиболее целесообразным видом модернизации. Однако многообразие технических решений приводит к появлению проблем интеграции оборудования в общие сети, дополняя ряд организационно-технических проблем модернизации станков и оборудования.

### **Организационно-технические проблемы модернизации станков на предприятиях ОПК**

При планировании и организации модернизации станков с ЧПУ необходимо учитывать: загрузку оборудования, трудозатраты и ассортимент производимых деталей, квалификацию работников, специфику производства. На каждом этапе планирования и организации модернизации возникают свои проблемы. При проведении модернизации парка станков с ЧПУ на предприятиях ОПК возникающие проблемы можно структурированно обобщить по группам:

1. Экономические: поиск источника финансирования; проведение расчетов экономической эффективности; необходима оценка целесообразности и рентабельности инвестиций в модернизацию оборудования, срока окупаемости. Для решения этого вида проблем важна отработка стратегии модернизации станочного парка на предприятии ОПК.

2. Организационные: согласование проекта модернизации; остановка оборудования; обеспечение условий по ремонту и модернизации станка в цеху; обеспечение доступа на предприятие ОПК специалистам по обслуживанию станков, сертификация модернизированного оборудования и т.д.

3. Технические: электромагнитная совместимость; виброустойчивость; пылезащищенность; согласование с существующей сетью электропитания; сопряжение новой электронной части с существующей электрической частью. Уровни управляющих сигналов в современных цифровых устройствах обычно не превышают единиц вольт, тогда как в модернизируемом станке могут потребоваться сигналы амплитудой в десятки вольт или более. Уровни электромагнитных помех в станках с ЧПУ первого и второго поколений обычно выше, чем в современных, собранных на основе микроЭВМ, что может при-

вести к определенным проблемам с их работоспособностью и потребует дополнительных мер для подавления помех.

4. Информационные: выбор интерфейса, системы команд, способа ввода/вывода и передачи информации; разделение ролей и обязанностей оператора станка с ЧПУ, наладчика и инженера-технолога. Для того чтобы в полной мере использовать функциональные возможности станка, необходимо создание оптимальных управляющих программ. Процесс разработки управляющих программ трудоемкий, поскольку разработчику необходимо учесть большое количество факторов от материала, конфигурации заготовки, требований к поверхностям до подбора инструмента, и это помимо собственно создания управляющей траектории. В идеале необходимо сопряжение с существующими возможностями CAD/CAM-систем.

5. Кадровые: новая система ЧПУ, как правило, имеет совершенно новый интерфейс и требует переобучения персонала как в области подготовки программ, так и работы с новым устройством.

6. Производственные: планирование производственного цикла и операций с учетом новых функциональных возможностей и технических характеристик модернизированного оборудования, обеспечивающих в целом снижение трудоемкости, повышение производительности и т.п.

Рассмотрим технические проблемы подробнее. Станки с ЧПУ I, II поколений в основном используют фазовую систему управления, станки III поколения – импульсные системы. Фазовые системы в отличие от более поздних импульсных систем используют аналоговые сигналы для управления приводами, то есть данная система управления является полностью аналоговой. Фазовые системы особо подвержены воздействию шумов, помех, искажений. При изменении внешних воздействий – температуры, влажности, вибрации – изменяются параметры аналоговых усилителей, фильтров и других элементов. Для аналоговой системы управления станками существует проблема точной передачи сигналов на большие расстояния из-за неидеальности, нелинейности линии связи, ограниченности полосы пропускания канала связи, нелинейности аналогового тракта, а также из-за действия разнообразных помех.

Рассматриваемые системы управления отличаются не только типом управляющего сигнала,



но также принципиальным различием управляющих воздействий, например длительностью воздействия, исполнительными механизмами, способом согласования управляющих и исполнительных блоков. Это, в частности, ведет к различию времени задержки управляющих воздействий, времени выполнения операций и т.п. Указанные различия приводят к тому, что управляющие системы модернизируемых станков разных поколений должны обрабатывать разные алгоритмы для реализации одной и той же функции.

Возникает вопрос, а возможен ли единый подход в модернизации станков как I, II, так и III, IV поколений? Что понимать под единым подходом к модернизации разных станков с ЧПУ?

### **Единый подход к модернизации станков с ЧПУ**

Несмотря на различие систем управления, в разных станках с ЧПУ возможно использовать общую элементную базу для реализации новых, модернизированных электронных блоков. Например, электронный блок на микроконтроллерах в принципе способен выработать разные необходимые управляющие воздействия и через буферные и/или согласующие каскады передать их на исполнительные механизмы. При этом можно использовать один и тот же интерфейс загрузки программ в станок.

Таким образом, с точки зрения элементной базы использование современных микроконтроллеров позволяет реализовать управляющий блок станка в едином варианте. Для возможности объединения модернизируемых станков в единую сеть обязательным условием будет являться общий для всех станков интерфейс управления. Однако в каждом случае программа микроконтроллера будет отличаться. Это затрудняет обслуживание станков, загрузку программы ЧПУ, понимание алгоритмов действий.

С точки зрения реализации требуемых функций для рациональной организации технологического процесса важно, чтобы одним загрузочным файлом можно было запустить выполнение одной операции (изготовление изделия) на модернизированных станках разного поколения. Оператор станков с ЧПУ не должен ощущать разницу в компиляции загружаемых команд и файлов, различие во внутренних алгоритмах микроконтроллера. То же относится и к наладчикам оборудования. Тогда понятие единого подхода связано с ори-

ентацией на единую программу технологической операции и загрузочный файл для разных станков с ЧПУ, на общую технологическую цепочку, но не на одну прошивку управляющего блока станка.

Единый подход заключается в сохранении одного функционала, обеспечения заданных характеристик и параметров технологического процесса, включением станков в единую сеть управления предприятием. Проще говоря, единый подход – изготовление одной и той же детали на разных станках по одной и той же управляющей программе с заданной точностью. Единая элементная база при этом позволит повысить надёжность и обеспечить высокую ремонтпригодность модернизируемых станков.

### **Заключение**

Таким образом, на основе обзора проблем, задач и вариантов модернизации станков с ЧПУ было показано, что на предприятиях ОПК существуют свои специфические особенности. Проблемы, возникающие при проведении модернизации станков с ЧПУ на предприятиях ОПК, а также при вводе модернизированных станков в эксплуатацию, обобщены и представлены по группам.

Проведенный анализ показывает, что замена электронной части станков с ЧПУ является наиболее целесообразным видом модернизации. Но для станков с ЧПУ разных поколений техническая реализация новых электронных блоков управления должна отличаться. Связано это с сопряжением либо с фазовой, либо с дискретной системой управления устаревших станков. Несмотря на это, модернизированные станки должны интегрироваться в единое технологическое пространство, иметь общий интерфейс, работать по одним алгоритмам.

Единый подход заключается в сохранении одного функционала, обеспечения заданных характеристик и параметров технологического процесса, включением станков в единую сеть управления предприятием. Проще говоря, единый подход – изготовление одной и той же детали на разных станках по одной и той же управляющей программе с заданной точностью. Единая элементная база при этом позволит повысить надёжность и обеспечить высокую ремонтпригодность модернизируемых станков. В основе новой системы ЧПУ предложено использовать современный микроконтроллер.

### Список литературы

1. Оценка эффективности использования основных производственных фондов оборонных предприятий (на примере АО «Концерн «Созвездие») / Хорев А.И., Падалкин В.Ю., Прыгунов А.М., Букреев А.М. // Вестник ВГУИТ. 2016. №3. С. 395–400.
2. Филиппов А.А. Аналитический обзор методов повышения эффективности предприятия // Материалы Международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения» (INTERMATIC-2014), Москва, 2014. Ч. 1. М.: МИРЭА, 2014. С. 228–236.
3. Силкина А.В., Ерыгина Л.В. Современное состояние и тенденции развития предприятий оборонно-промышленного комплекса // Вестник СибГАУ. 2017. Т.18. №1. С. 243–249.
4. Ибрагимов О.Е. Проблемы организации устойчивого развития оборонно-промышленного комплекса в России // Управление устойчивым развитием. 2016. №6. С. 36–42.
5. Мовтян Б.А., Данилаев Д.П. Роль корпоративного центра в повышении эффективности выполнения гособоронзаказа предприятиями ОПК // Организатор производства. 2018. Т. 26. №3. С. 44–56.
6. Мовтян Б.А., Данилаев Д.П. Задачи и методы корпоративного управления эффективностью выполнения гособоронзаказа // Научно-технический вестник Поволжья. 2018. № 8. С. 24–26.
7. Капитальный ремонт и модернизация станков с ЧПУ [Электронный ресурс] // Сайт «Прибор-Сервис». URL: <http://pribor-serv.ru/капитальный-ремонт-и-модернизация-ст-2/> (Дата обращения 20.07.2020. Доступ свободный).
8. Ерыгин Ю.В., Рагозина М.А. Инструменты стратегического планирования производственной программы предприятий оборонно-промышленного комплекса // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. 2011. № 2 (35). С. 197–201.
9. Антамошкин А.Н., Балобан Т.Е. Специфика оценки рисков инноваций на предприятиях оборонно-промышленного комплекса // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. 2010. № 3 (29). С. 181–183.
10. Циркунова А., Шахнович И. Государственный оборонный заказ по новым правилам // Электроника: наука, технология, бизнес. 2015. №10. С. 50–59.
11. Туровец О.Г., Родионов В.Б., Бухалков М.И. Организация производства и управление предприятием: учебник. 3-е изд. М.: ИНФРА-М, 2011. 506 с.
12. Ложников И.Н. Выполнение гособоронзаказа: порядок учета производства продукции, выполнения работ и оказания услуг. Ч. 2 // Вестник бухгалтера Московского региона. 2016. №4. С.10–15.
13. ГОСТ РВ 0015-002-2012. Система разработки и постановки на производство военной техники. Системы менеджмента качества. Общие требования [Электронный ресурс]. URL: [www.novsu.ru/file/1111316](http://www.novsu.ru/file/1111316) (Доступ свободный. Дата доступа 05.07.2020).
14. Босинзон М.А. Современные системы ЧПУ и их эксплуатация: учебник для нач. проф. образования / под ред. Б.И.Черпакова. 2-е изд., стер. М.: Издательский центр «Академия», 2008. 192 с.
15. Платонов В.В., Майзель И.Г. Модернизация металлообрабатывающих станков с числовым программным управлением // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2019. Т.23. №2. С. 285–295. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-285-295.
16. Фролов А.Ю. Модернизация станков с ЧПУ [Электронный ресурс] // Сайт «Инженер поможет». 2016. URL: <http://engcrafts.com/item/406-modernizatsiya-stankov-s-chpu> (Доступ свободный. Дата доступа 15.07.2020).
17. Митряев К.Ф., Сазонов М. Б. Изучение конструкции станка 6М13ГН1. Самара: Самар. авиац. ин-т, 1992. 16 с.

### References

1. Khorev A.I., Padalkin V.Yu., Prygunov A.M., Bukreev A.M. Evaluation of the efficiency of using the basic production assets of defense enterprises (by the example of JSC Sozvezdie Concern). *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET], 2016, no. 3, pp. 395–400. (In Russ.)
2. Filippov A.A. Analytical review of methods for increasing the efficiency of an enterprise. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Fundamentalnye problemy radioelektronnogo priborostroeniya" (INTERMATIC-2014)* [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference INTERMATIC-2014 "Fundamental Problems of Radioengineering and Device Construction"]. Moscow: MIREA, part 1, pp. 228–236. (In Russ.)
3. Silkina A.V., Erygina L.V. Current state and development trends of enterprises of the military-industrial complex. *Vestnik SibGAU* [Bulletin of SibSAU], 2017, vol. 18, no. 1, pp. 243–249. (In Russ.)
4. Ibragimov O.E. Problems of organizing sustainable development of the military-industrial complex in Russia. *Upravlenie ustoychivym razvitiem* [Management of Sustainable Development], 2016, no. 6, pp. 36–42. (In Russ.)
5. Movtyan B.A., Danilaev D.P. The role of the corporate center in improving the efficiency of the implementation of state defense orders by the defense enterprises. *Organizator proizvodstva* [Organizer of Production], 2018, vol. 26, no. 3, pp. 44–56. (In Russ.)
6. Movtyan B.A., Danilaev D.P. Objectives and methods of corporate management of the state defense order performance. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Povolzhya* [Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region], 2018, no. 8, pp. 24–26. (In Russ.)

7. Overhaul and modernization of CNC machines [Electronic resource]. Pribor-Service website. Available at: <http://pribor-serv.ru/капитальный-ремонт-и-модернизация-ст-2> (Accessed on July 20, 2020. Free access).
8. Erygin Yu.V., Ragozina M.A. Strategic planning tools for the production program of enterprises of the military-industrial complex. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M.F. Reshetneva* [Bulletin of Reshetnev Siberian State Aerospace University], 2011, no. 2 (35), pp. 197–201. (In Russ.)
9. Antamoshkin A.N., Baloban T.E. The specific character of risk assessment of innovations at enterprises of the military-industrial complex. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M.F. Reshetneva* [Bulletin of Reshetnev Siberian State Aerospace University], 2010, no. 3 (29), pp. 181–183. (In Russ.)
10. Tsirkunova A., Shakhnovich I. State defense orders under new rules. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes* [Electronics: Science, Technology, Business], 2015, no. 10, pp. 50–59. (In Russ.)
11. Turovets O.G., Rodionov V.B., Bukhalkov M.I. *Organizatsiya proizvodstva i upravlenie predpriyatiem: uchebnik* [Organization of production and enterprise management: Textbook]. 3rd ed. Moscow: INFRA-M, 2011, 506 p. (In Russ.)
12. Lozhnikov I.N. Fulfillment of state defense orders: the procedure for accounting of the manufacturing of products, performance of work and the provision of services (part 2). *Vestnik bukhgaltera Moskovskogo regiona* [Bulletin of Accountants of the Moscow Region], 2016, no. 4, pp. 10–15. (In Russ.)
13. GOST RV 0015-002-2012. The system of the development and production of military equipment. Quality management systems. General requirements [Electronic resource]. Available at: [www.novsu.ru/file/1111316](http://www.novsu.ru/file/1111316) (Free access. Accessed on July 05, 2020).
14. Bosinzon M.A. *Sovremennye sistemy ChPU i ikh ekspluatatsiya: uchebnik dlya nach. prof. obrazovaniya* [Modern CNC systems and their operation: a textbook for initial vocational education]. Ed. by B.I. Cherpakov. 2nd ed., stereotyp. Moscow: Academy Publishing Center, 2008, 192 p. (In Russ.)
15. Platonov V.V., Maizel I.G. Modernization of computer numerically controlled machines. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2019, vol. 23, no. 2, pp. 285–295. DOI: 10.21285 / 1814-3520-2019-2-285-295.
16. Frolov A.Yu. Modernization of CNC machines [Electronic resource]. Website "Engineers will help". 2016. Available at: <http://engcrafts.com/item/406-modernizatsiya-stankov-s-chpu> (Free access. Accessed on July 15, 2020).
17. Mitryaev K.F., Sazonov M.B. *Izuchenie konstruksii stanka 6M13GN1* [Studying the design of machine 6M13GN1]. Samara: Samara Aviation Institute, 1992, 16 p. (In Russ.)

Поступила 28.08.2020; принята к публикации 08.10.2020; опубликована 25.12.2020  
Submitted 28/08/2020; revised 08/10/2020; published 25/12/2020

**Антонов Аркадий Юрьевич** – ассистент,

Казанский национальный исследовательский технический университет им.А.Н.Туполева – КАИ, Россия, Казань. Email: [ayuantonov@kai.ru](mailto:ayuantonov@kai.ru)

**Данилаев Дмитрий Петрович** – доктор технических наук, доцент,

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Россия, Казань. Email: [dpdaniilaev@kai.ru](mailto:dpdaniilaev@kai.ru)

**Arkadiy Yu. Antonov** – Assistant,

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia. Email: [ayuantonov@kai.ru](mailto:ayuantonov@kai.ru)

**Dmitry P. Danilaev** – DrSc (Eng.), Associate Professor,

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia. Email: [dpdaniilaev@kai.ru](mailto:dpdaniilaev@kai.ru)

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 536.2

DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-4-57-64



## ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОЛИМЕРНЫМ СВЯЗУЮЩИМ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

Сулаберидзе В.Ш., Скорнякова Е.А.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,  
Санкт-Петербург, Россия

**Аннотация.** Приведены модели для расчета теплопроводности композиционных материалов на основе полимерных связующих (силикон, полиуретан, эпоксидная смола) с одним или двумя видами мелкодисперсных минеральных наполнителей. Построение моделей основано на теории обобщенной проводимости с учетом эффекта инверсии компонент. Путем сравнения расчетов с экспериментами оценены значения параметров расчетных моделей: теплопроводность агрегатов наполнителей при различных связующих, коэффициенты инверсии связующее-наполнитель в формулах Оделевского и Миснара, параметр влияния отношения теплопроводностей наполнителя и связующего в модифицированной формуле Бургера. Для минеральных порошков в состоянии свободной засыпки (в воздушной среде) зависимость эмпирического коэффициента  $C$  в формуле Бургера от отношения теплопроводностей порошка и воздуха имеет некоторые отличия ввиду того, что дисперсная фаза в воздушной среде имеет гораздо больше возможностей по изменению положения частиц в пространстве и образованию контактов и «проводящих каналов», «разрушающих» изолированность твердой фазы и увеличивающих тем самым эффективную проводимость смеси. В представленной работе измерена теплопроводность порошков в состоянии свободной засыпки, для которых был проведен анализ по модифицированной формуле Бургера. Показано, что теплопроводность агрегатов существенно ниже теплопроводности кристаллических частиц наполнителя, но близка к теплопроводности порошковых керамик или спеченных порошков, что объясняется образованием агрегатов, эффективная теплопроводность которых существенно ниже теплопроводности кристаллических частиц. Оцененные значения параметров расчетных моделей для широкого круга наполнителей и различных связующих позволяют прогнозировать теплопроводность вновь разрабатываемых композиций функциональных материалов, например по модифицированной формуле Бургера с погрешностью в пределах  $\pm 20\%$  ( $P=0,95$ ).

**Ключевые слова:** композиционный материал, полимерное связующее, мелкодисперсный наполнитель, модель теплопроводности, теория обобщенной проводимости, инверсия компонент, параметры модели, теплопроводность агрегатов частиц наполнителя, эффективная теплопроводность композиции.

© Сулаберидзе В.Ш., Скорнякова Е.А., 2020

### Для цитирования

Сулаберидзе В.Ш., Скорнякова Е.А. Оценка параметров расчетных моделей теплопроводности композиционных материалов с полимерным связующим по экспериментальным данным // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №4. С. 57–64. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-4-57-64>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

## ESTIMATION OF THERMAL CONDUCTIVITY CALCULATION MODEL PARAMETERS FOR COMPOSITE MATERIALS WITH A POLYMER BINDER BASED ON EXPERIMENTAL DATA

Sulaberidze V.Sh., Skorniakova E.A.

Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia

**Abstract.** The paper presents thermal conductivity calculation models of composite materials based on polymer binders (silicone, polyurethane, epoxy resin) with one or two types of fine mineral fillers. The models are constructed on the theory of generalized conductivity taking into account the effect of component inversion. By comparing the calculations with the experiments, the authors estimated the parameters values of the calculation models: the thermal conductivity of filler aggregates with various binders, the binder-filler inversion coefficients in the Odelevsky and Misnar formulas, the influence of the ratio between the thermal conductivities of the filler and the binder in the modified Burgers equation. Regarding mineral powders in the state of free filling (in air), the dependence of the empirical coefficient C in the Burgers equation on the ratio of the thermal conductivities of the powder and air has some differences due to the fact that the dispersed phase in air has much more possibilities to change the position of particles in space and to form contacts and "conducting channels" that "destroy" the isolation of the solid phase and thereby increase the effective conductivity of the mixture. The presented paper shows the measured thermal conductivity of powders in the state of free filling analyzed according to the modified Burgers equation. It is shown that the thermal conductivity of the aggregates is significantly lower than the thermal conductivity of crystalline filler particles, but close to the thermal conductivity of powder ceramics or sintered powders, which is explained by the formation of aggregates, whose effective thermal conductivity is significantly lower than the thermal conductivity of crystalline particles. The estimated values of the calculation model parameters for a wide range of fillers and various binders make it possible to predict the thermal conductivity of newly developed compositions of functional materials, for example, according to the modified Burgers equation with an error within  $\pm 20\%$  ( $P = 0.95$ ).

**Keywords:** composite material, polymer binder, finely dispersed filler, thermal conductivity model, theory of generalized conductivity, inversion of components, model parameters, thermal conductivity of aggregates of filler particles, effective thermal conductivity of a composition.

### For citation

Sulaberidze V.Sh., Skorniakova E.A. Estimation of Thermal Conductivity Calculation Model Parameters for Composite Materials with a Polymer Binder Based on Experimental Data. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020, vol. 18, no. 4, pp. 57–64. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-4-57-64>

### Введение

Теоретическое описание теплопроводности, как и других явлений переноса в различных средах – электропроводности, диффузии, диэлектрической и магнитной проницаемости, основывается на сходстве основополагающих уравнений. Теоретические обобщения и их применение для единообразного описания явлений переноса выразилось в появлении теории «обобщенной проводимости», объединившей целый ряд структурно чувствительных свойств физико-механических композиций, зависящих не только от содержания компонентов в композиции (таких, например, как плотность или удельный объем), но и от ее структуры и ориентации границ раздела компонентов. Структурно-чувствительными для композиционных материалов являются диэлектрическая и магнитная проницаемости, теплопроводность, модули сдвига, упругость и т.д. [1].

По результатам теоретических и экспериментальных исследований композиций, обобщенных в работах [1–6], можно сделать следующие выводы:

1) теоретические модели двухкомпонентных смесей: связующее (сплошная среда) и наполнитель (мелкодисперсные частицы), как правило, содержат ряд предположений относительно свойств и характеристик фаз, а именно:

а) упрощенная и правильная геометрия частиц наполнителя;

б) заданное распределение частиц наполнителя в объеме связующего (хаотичное или упорядоченное), при котором возможно выделение типовой элементарной ячейки, характеризующей структуру композиции в целом;

в) изолированность или связность фаз наполнителя и/или связующего;

г) идеальный или обусловленный тепловой



контакт частиц наполнителя со связующим;

д) отсутствие химического взаимодействия компонент (механическая смесь);

е) перенос тепла по основному механизму (в диапазоне средних положительных температур по шкале Цельсия и в оптически непрозрачных средах это кондуктивная теплопроводность);

2) характеристики компонент, а также условия работы материала, такие как площадь контакта частиц, размеры частиц и шероховатость их поверхности, теплопроводность, температура, влажность и др., являются исходными данными, используемыми в качестве основы для расчетов теплопроводности гетерогенного материала по теоретическим моделям.

Следует отметить, что при разработке расчетной модели могут быть допущены некоторые упрощения, необходимость которых обусловлена значительным усложнением расчетных формул для детальных моделей переноса тепла в гетерогенных материалах. Создание детальных моделей не избавляет от необходимости введения эмпирических коэффициентов с целью обеспечения требуемой точности, а даже, наоборот, приводит к недостаточной универсальности разработанной модели и громоздкости расчетных формул, что является неприемлемым на практике [4]. Сказанное выше объясняет актуальность проводимых исследований, нацеленных на создание адекватных моделей, позволяющих наиболее точно описать свойства новых композиционных материалов.

Особый интерес в рамках представленной работы вызывают материалы, в качестве основы которых используется полимерное связующее и мелкодисперсные минеральные наполнители.

В качестве оцениваемых параметров моделей выступают коэффициенты инверсии компонент композиции, а также плотность и теплопроводность агрегатов наполнителя.

### Расчетные модели

Известно несколько расчетных моделей теплопроводности подобных материалов:

- Формула Бургера [3] (для сферических частиц):

$$\lambda_{эф} = \frac{V_{св} \lambda_{св} + C V_{н} \lambda_{н}}{V_{св} + C V_{н}}. \quad (1)$$

Из нашего опыта следует (далее будет показано на экспериментальных данных), что коэффициент  $C$  зависит от характеристик распределения фаз в смеси:  $C=1$  – гомогенная смесь,

$C \ll 1$  – изолированная фаза наполнителя,  $C > 1$  – непрерывная фаза наполнителя.

- Формула Максвелла [6]:

$$\lambda_{эф} = \lambda_{св} \left( \frac{\lambda_{н} + 2\lambda_{св} - 2V_{н}(\lambda_{св} - \lambda_{н})}{\lambda_{н} + 2\lambda_{св} + V_{н}(\lambda_{св} - \lambda_{н})} \right). \quad (2)$$

- Формула Оделевского [4] (для кубических замкнутых включений):

$$\lambda_{эф} = \lambda_{св} \left( 1 - \frac{V_{н}}{\frac{1}{1 - \lambda_{н} / \lambda_{св}} - \frac{1 - V_{н}}{3}} \right). \quad (3)$$

- Формула Миснара [2] (для кубических частиц, ориентированных перпендикулярно вектору теплового потока):

$$\lambda_{эф} = \lambda_{св} \left( 1 + V_{н} \frac{1 - \lambda_{св} / \lambda_{н}}{1 - V_{н}^{1/3} (1 - \lambda_{св} / \lambda_{н})} \right). \quad (4)$$

Обозначения в формулах (1)–(4):  $V_{н}$  – объемная доля наполнителя;  $V_{св}$  – объемная доля связующего;  $\lambda_{н}$ ,  $\lambda_{св}$  и  $\lambda_{эф}$  – теплопроводности наполнителя, связующего и эффективная теплопроводность композиции соответственно. При этом под связующим понимается непрерывная фаза, а под наполнителем – прерывистая.

Для случаев, когда соотношения коэффициентов теплопроводности компонент  $\lambda_{н}/\lambda_{св}$  составляют значения как меньше, так и больше единицы, расчетные значения эффективной теплопроводности смеси могут быть получены по указанным выше формулам.

В представленных выше расчетных моделях учитываются определенные свойства и содержание компонент смеси. В случае с реальными системами наблюдается влияние агрегации частиц наполнителя, которая приводит к изменению свойств наполнителя, порогового эффекта образования «бесконечного кластера», неидеальности границ раздела фаз и модификации свойств на границе наполнитель/связующее, а также влияние включений неучитываемых компонент, например силиконового масла в силиконовом связующем, наличие технологической пористости и др.

Следует отметить, что наличие эмпирического коэффициента  $C$  в формуле Бургера (1) делает ее довольно удобной для оценок теплопроводности двухкомпонентных смесей в широком диапазоне изменения свойств компонент: плотность, объемная доля, теплопроводность. Значение коэффициента  $C$  косвенно

учитывает важные характеристики материала: непрерывность или прерывистость фаз каждой из компонент, отношение их коэффициентов теплопроводности и возможно даже форму частиц наполнителя. Тем не менее для каждой конкретной композиции приходится подбирать значение коэффициента  $C$ , что снижает универсальность формулы.

Проведенные нами измерения и расчеты по формуле (1) для различных комбинаций мелкодисперсных наполнителей и полимерного связующего выявили устойчивую зависимость коэффициента  $C$  от отношения  $\lambda_n/\lambda_{св}$  в широком диапазоне значений эффективной теплопроводности гетерогенной смеси  $\lambda_{эф}$  и объемного содержания наполнителя  $V_n$  [7, 8]. Принимаемое для дальнейших расчетов теплопроводности композиций по модифицированной формуле Бургера значение коэффициента  $C$  в двухкомпонентных и трехкомпонентных композиционных материалах показано на **рис. 1**.

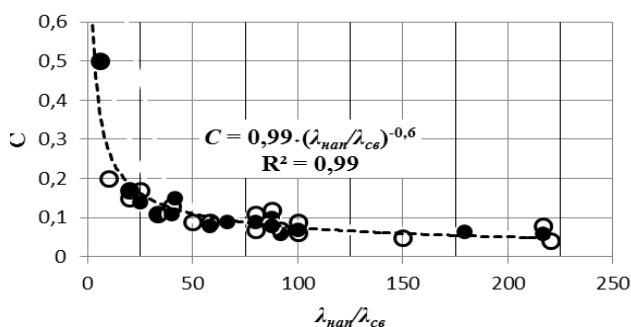


Рис. 1. Характер зависимости коэффициента  $C$  в модифицированной формуле Бургера от величины отношения  $\lambda_{нап}/\lambda_{св}$  (температура 20°C) для двухкомпонентной (●) и трехкомпонентной (○) композиций

Fig. 1. The nature of the dependence of the coefficient  $C$  in the modified Burgers equation on the value of the ratio  $\lambda_f / \lambda_b$  (temperature is 20°C) for two-component (●) and three-component (○) compositions

Зависимость коэффициента  $C$  от отношения  $\lambda_n/\lambda_{св}$  универсальна для разных связующих (силикон, полиуретаны, эпоксидная смола) и мелкодисперсных порошковых наполнителей в широком диапазоне изменения значений теплопроводности и объемного содержания наполнителя. Согласие расчетов с экспериментом, с учетом разброса данных, вызванного структурной неоднородностью образцов, можно признать удовлетворительным.

С целью повышения согласия расчетов, которые были получены по формулам (3) и (4), и

измеренных значений теплопроводности при значительной неоднородности компонент по свойству был применен метод конструирования формулы эффективной теплопроводности путем инверсии наполнителя и связующего, опробованный, в частности, на системах «кремнийорганический эластомер – порошкообразный минеральный наполнитель» [9].

При исследованиях двухкомпонентных смесей с использованием метода инверсии компонент проводятся расчеты, когда одна из компонент является связующей (непрерывная фаза), а другая наполнителем (дискретная фаза), а затем их меняют местами в расчетных формулах для вычисления значения теплопроводности исследуемой смеси (композиции).

Соображения о применении в расчетных моделях принципа взаимной замены (инверсии) компонент в структуре элементарной расчетной ячейки и конструирования формулы для вычисления эффективной теплопроводности гетерогенной композиции формулировались давно. Известны предлагавшиеся Лихтенеккером (публикация 1909-го года), Миснаром и другими авторами способы так называемого «смешивания проводимостей» и конструирования формулы для эффективной теплопроводности [4]. Выбранный нами для дальнейших расчетов метод инверсии компонент заключается в определении эффективной теплопроводности гетерогенного материала по формуле

$$\lambda_{эф} = a_1 \lambda_1 + a_2 \lambda_2, \quad (5)$$

где  $\lambda_1$  — эффективная теплопроводность смеси: связующее — порошок (твердые частицы); наполнитель — полимер (силикон, полиуретан и др.);

$\lambda_2$  — эффективная теплопроводность смеси: связующее — полимер; наполнитель — порошок;

$a_1, a_2$  — эмпирические коэффициенты, подбираемые по правилу нормировки:  $a_1 + a_2 = 1$ ;  $a_1 < a_2$ .

Полученные нами результаты расчетов в рамках теории проводимости и инверсии компонент приведены в работах [8, 10]. Расчеты проводились по формулам Оделевского (3) и Миснара (4).

Однако необходимо отметить, что для минеральных порошков в состоянии свободной заправки (в воздушной среде) зависимость  $C$  в формуле Бургера от отношения теплопроводностей порошка и воздуха несколько иная. Полученные нами ранее результаты для таких смесей [7] показали, что основная причина этого заклю-

чается в том, что дисперсная фаза в воздушной среде имеет гораздо больше возможностей по изменению положения частиц в пространстве и образованию контактов и «проводящих каналов», «разрушающих» изолированность твердой фазы и увеличивающих тем самым эффективную проводимость смеси.

В данной работе была измерена теплопроводность порошков в состоянии свободной засыпки, для которых был проведен анализ по модифицированной формуле Бургера и получена несколько иная, по сравнению с показанной на рис.1, зависимость коэффициента  $C$  от отношения  $\lambda_{\text{пор}}/\lambda_{\text{возд}}$ . В условиях измерения теплопроводности исследуемых образцов конвективный перенос тепла незначителен, поскольку разность температур на образцах мала, поэтому основным механизмом переноса тепла является теплопроводность, а не конвективный перенос тепла. В расчетах использованы те же значения теплопроводности агрегатов, что и для композиций на основе полимерных связующих. В целом, по уже указанной причине, значения коэффициента  $C$  получились несколько выше для таких же, как в двух и трех-компонентных материалах, объемных содержаний наполнителя (порошка) (рис. 2).

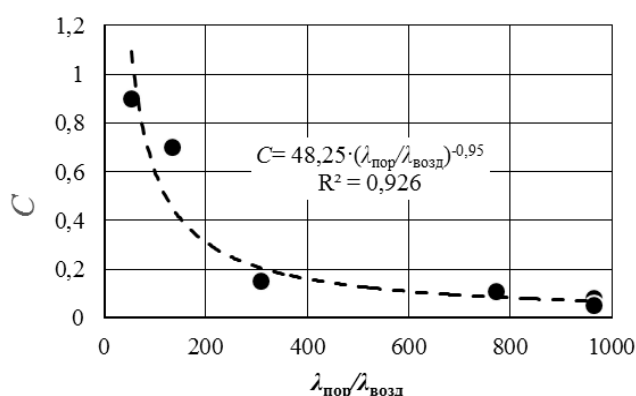


Рис. 2. Характер зависимости коэффициента  $C$  в формуле Бургера от величины отношения  $\lambda_{\text{пор}}/\lambda_{\text{возд}}$  (температура 20°C) для различных порошков в воздушной среде

Fig. 2. The nature of the dependence of the coefficient  $C$  in the Burgers equation on the value of the ratio  $\lambda_{\text{pow}}/\lambda_{\text{air}}$  (temperature is 20°C) for various powders in air

Для всех исследованных композиций значения коэффициентов  $a_1$  и  $a_2$  принимались одними и теми же – 0,1 и 0,9 соответственно, что делало формулу (5) универсальной. Расчетные оценки в целом согласовывались с экспериментальными данными по всей совокупности исследованных

композиций и значений объемных содержаний наполнителей.

Оцененные по результатам сравнения расчетов с экспериментами значения теплопроводности наполнителя соответствуют эффективной теплопроводности агрегатов мелкодисперсных частиц, и они существенно ниже теплопроводности кристаллических частиц. Это объясняется образованием агрегатов, эффективная теплопроводность которых существенно ниже теплопроводности кристаллических частиц.

В подтверждение этого предположения нами была измерена теплопроводность порошка AlN (серый) при свободной, но уплотненной засыпке (плотность засыпки указана в таблице), при этом значения теплопроводности засыпок при 20°C находились в диапазоне (0,8–1,15) Вт/(м·К).

По результатам расчетов согласно формулам (3), (4) и (1) для коэффициента теплопроводности твердых частиц 22 Вт/(м·К) были получены следующие значения теплопроводности засыпки: 0,83; 0,90 и 1,15 Вт/(м·К). Полученные результаты согласуются с приведенной выше оценкой теплопроводности наполнителя.

Приведенные выше данные позволяют считать правомерным утверждение о том, что теплопроводность агрегатов порошка AlN в силиконе при 20°C более чем на порядок ниже коэффициента теплопроводности монокристаллического AlN (см. таблицу).

С целью сравнения фаз наполнителя были подобраны два образца с примерно одинаковым содержанием AlN: первый – 30 об.% AlN (серый) ( $\lambda = 1,11$  Вт/(м·К)) и второй – 22,5 об.% AlN (белый) ( $\lambda = 1,32$  Вт/(м·К)). В результате исследований установлено:

- фаза наполнителя в первом образце состоит преимущественно из включений округлой формы (от 50 до 250 мкм), при этом большая часть наполнителя содержится во включениях размером 70–80 мкм;

- фаза наполнителя второго образца преимущественно состоит из включений округлой формы (от 30 до 150 мкм), большая часть наполнителя содержится во включениях размером 30–50 мкм.

Из этого следует, что эффективная теплопроводность более мелких агрегатов частиц наполнителя выше, чем более крупных. Из этого также следует, что максимально возможное измельчение просушенного порошка из твердых кристаллических частиц позволит увеличить теплопроводность композиции при том же объемном содержании наполнителя [10].

Таблица. Результаты оценки параметров расчетных моделей (плотность и теплопроводность агрегатов частиц наполнителей) эффективной теплопроводности композиций на основе полимерных связующих и мелкодисперсных порошковых наполнителей  
 Table. Assessment of calculation model parameters (density and thermal conductivity of filler particle aggregates) of the effective thermal conductivity of compositions based on polymer binders and fine powder fillers

Свойство	SiO <sub>2</sub> марка Б порошок	SiO <sub>2</sub> (плав. полые мик- росферы)	ZnO	SiC	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	AlN белый	AlN серый	TiO <sub>2</sub>	αBN	SiO <sub>2</sub> кристо- балит	Al(OH) <sub>3</sub>	CaSiO <sub>3</sub> волластонит	Примечания
Порошок в состоянии свободной засыпки													
ρ, г/см <sup>3</sup>	–	0,5	0,4–0,5	0,53	–	–	1,4–1,5*	0,57	0,37–0,40	0,57	0,6–0,8	–	* Засыпка с уплотнением
λ, Вт/(м·К) при 20 °С	–	0,3	0,38	0,42	–	–	0,8–1,15	0,35	–	0,40	0,33–0,45	–	
Наполнитель в композиции с полимерным связующим (силикон СКТН А, полиуретан СУРЭЛ-7, BASF, эпоксидная смола ЭД-20)													
ρ, г/см <sup>3</sup>	2,3–2,65	2,2	3,72	3,1–3,23	3,7–3,97	3,26	3,26	4,0–5,1	2,1	2,3	2,35–2,42	2,78–2,92	Пикнометриче- ская плотность наполнителя
λ <sub>нап.</sub> , Вт/(м·К) (жидкие образцы) при 20 °С	СКТН А	1,38	–	21–25	11–14	48–55	18–25	3,5	50	6–8	18–23	2,5	Значения λ <sub>нап.</sub> , подобранные при описании экспе- риментальных данных формула- ми Оделева и Бургера [11]
	СУРЭЛ-7	1,38	–	–	8–13	37–42	32–39	–	60	–	–	–	
	BASF	–	–	–	–	≈25	–	–	–	–	≈15	–	
ЭД-20	8–10	1,38	–	–	11–16	37–43	–	–	–	–	–	–	
Кристалл/керамика/спеченный порошок													
ρ, г/см <sup>3</sup>	2,6–2,65	2,5–2,6	5,7	3,23	3,95–4,02	3,26	3,26	4,0–5,1	2,1	2,5	3,97–4,42	2,78–2,92	Невыделенный шрифт – пикнометриче- ская плотность
λ, Вт/(м·К) при 20 °С	– – 6,82–11,4	1,38	54 15–30 –	490 (а) текс. 175 29	300 18–34 28–40	200–300 138–200 –	–	– – 7–8	– 180 30	– – 7–13	– – –	– 0,5–2,0 0,3–0,5	Данные из раз- личных источни- ков физических свойств материа- лов



### Оценка параметров моделей

Значение параметров расчетных моделей эффективной теплопроводности композиций на основе полимерных связующих и мелкодисперсных порошковых наполнителей были оценены путем сравнения расчетов с полученными авторами экспериментальными данными по теплопроводности гетерогенных композиций на основе полимерных связующих и мелкодисперсных минеральных наполнителей.

Значения теплопроводности наполнителя  $\lambda_n$  оценивали по модели Оделевского (3), Миснара (4) и модифицированной формуле Бургера (1), в которой эмпирический коэффициент  $C$  представлял собой параметр композиции, характеризующий неоднородность ее компонент по теплопроводности:  $C=f(\lambda_{\text{нап}}/\lambda_{\text{св}})$  или  $C=f(\lambda_{\text{пор}}/\lambda_{\text{возд}})$  – для порошков в воздушной среде.

Значение истинной плотности порошка наполнителя определяли пикнометрическим методом.

Значения коэффициентов в формуле инверсии компонент  $a_1$ ,  $a_2$  принимались постоянными для всех рассмотренных комбинаций компонент и обеспечивающими минимизацию различий в измеренных и рассчитанных значениях эффективной теплопроводности композиции.

Из данных, приведенных в таблице, следует, что:

- оценки  $\lambda_{\text{нап}}$  отличаются незначительно для одних и тех же наполнителей при разных связующих;
- теплопроводность агрегатов наполнителей значительно выше теплопроводности порошковой засыпки, даже с дополнительным прокаливанием и уплотнением порошка;
- теплопроводность агрегатов существенно ниже теплопроводности кристаллических частиц наполнителя, но близка к теплопроводности порошковых керамик или спеченных порошков.

### Список литературы

1. Эдвабник В.Г. К теории обобщенной проводимости смесей // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1–2. С. 76.
2. Миснар А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций. М.: Мир, 1968. 464 с.
3. Чудновский А.Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов. М.: Физматгиз, 1962. 456 с.
4. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Л.: Энергия, 1974. 264 с.
5. Годовский Ю.К. Теплофизические методы исследования полимеров. М.: Химия, 1976. 215 с.
6. Шевченко В.Г. Основы физики полимерных композиционных материалов: учебное пособие. М.: МГУ, 2010. 99 с.
7. Сулаберидзе В.Ш., Мушенко В.Д., Михеев В.А. Теплопроводность гетерогенных композиций на основе полимеров с минеральными наполнителями: монография. СПб.: ИПФ «Реноме», 2016. 92 с.
8. Михеев В.А., Сулаберидзе В.Ш., Мушенко В.Д. Моделирование теплопроводности трехкомпонентных композиций // Изв. вузов. Приборостроение. Т. 59, № 7. 2016. С. 7–14.
9. Кириллов В.Н., Дубинкер Ю.Б. и др. Теплопроводность систем, кремнийорганический эластомер – порошкообразный минеральный наполнитель // ИФЖ. Т. XXIII, №3. 1972. URL: <http://www.viam.ru/public>.

Оцененные значения параметров расчетных моделей для широкого круга наполнителей и различных связующих позволяют, как это показано нами и в работе [11] (рис. 3), прогнозировать теплопроводность вновь разрабатываемых композиций функциональных материалов, например по модифицированной формуле Бургера с погрешностью в пределах  $\pm 20\%$  ( $P=0,95$ ).

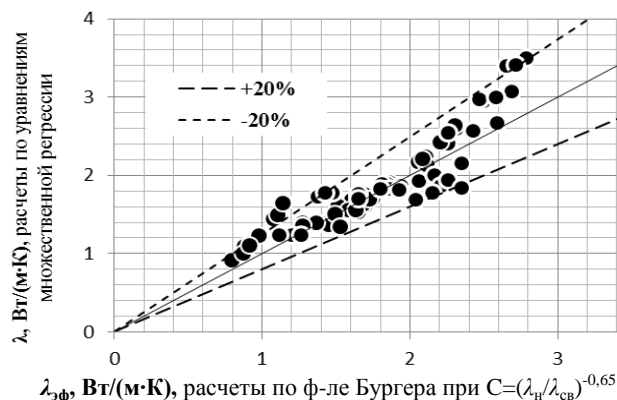


Рис. 3. Сравнение расчетов по формуле Бургера с расчетами по уравнениям множественной регрессии

Fig. 3. Comparison between the calculations using the Burgers equation and the calculations using multiple regression equations

Новизна представленных в работе результатов заключается в оценке (уточнении) параметров расчетных моделей, основанных на известных формулах Оделевского, Миснара, Бургера, что позволяет с приемлемой точностью (в пределах  $\pm 20\%$ ) проводить оценку теплопроводности вновь разрабатываемых композиционных материалов. Эффективность применения выбранного авторами подхода к моделированию теплопроводности подчеркивается и рядом других работ [12–14].



10. Михеев В.А., Сулаберидзе В.Ш., Мушенко В.Д. Исследование теплопроводности композиционных материалов на основе силикона с наполнителями // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 7. С. 167–172.
11. Михеев В.А., Сулаберидзе В.Ш. Расчетно-экспериментальные исследования эффективной теплопроводности композиционных материалов на основе полимеров // Мир измерений. № 3 (175). 2017. С. 26–28.
12. Agrawal A., Satapathy A. Mathematical model for evaluating effective thermal conductivity of polymer composites with hybrid fillers // Intern. J. of Thermal Sciences. 2015. Vol. 89. P. 203–209.
13. Xua J., Gaoa B., Dua H., Kanga F. A statistical model for effective thermal conductivity of composite materials // Intern. J. of Thermal Sciences. 2016. Vol. 104. P. 348–356.
14. Xu J.Z., Gao B.Z., Kang F.Y. A reconstruction of Maxwell model for effective thermal conductivity of composite materials // Applied Thermal Engineering. 2016. Vol. 102. N 6. P. 972–979.

#### References

1. Edvabnik V.G. On the theory of generalized conductivity of mixtures. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Current Problems of Science and Education], 2015, no. 1–2, p. 76. (In Russ.)
2. Misnar A. *Teploprovodnost tverdykh tel, zhidkostey, gazov i ikh kompozitsiy* [Thermal conductivity of solids, liquids, gases and their compositions]. Moscow: Mir, 1968, 464 p. (In Russ.)
3. Chudnovsky A.F. *Teplofizicheskie kharakteristiki dispersnykh materialov* [Thermophysical characteristics of dispersed materials]. Moscow: Fizmatgiz, 1962, 456 p. (In Russ.)
4. Dulnev G.N., Zarichnyak Yu.P. *Teploprovodnost smesey i kompozitsionnykh materialov* [Thermal conductivity of mixtures and composite materials]. Leningrad: Energiya, 1974, 264 p. (In Russ.)
5. Godovsky Yu.K. *Teplofizicheskie metody issledovaniya polimerov* [Thermophysical methods for studying polymers]. Moscow: Khimiya, 1976, 215 p. (In Russ.)
6. Shevchenko V.G. *Osnovy fiziki polimernykh kompozitsionnykh materialov: uchebnoe posobie* [Fundamentals of physics of polymer composite materials: the study guide]. Moscow: Moscow State University, 2010, 99 p. (In Russ.)
7. Sulaberidze V. Sh., Mushenko V.D., Mikheev V.A. *Teploprovodnost geterogennykh kompozitsiy na osnove polimerov s mineralnymi napolnitelyami: monografiya* [Thermal conductivity of heterogeneous compositions based on polymers with mineral fillers: the monograph]. Saint Petersburg: Renome, 2016, 92 p. (In Russ.)
8. Mikheev V.A., Sulaberidze V.Sh., Mushenko V.D. Modeling of thermal conductivity of three-component compositions. *Izvestiya vuzov. Priborostroyeniye* [Journal of Instrument Engineering], 2016, vol. 59, no. 7, pp. 7–14. (In Russ.)
9. Kirillov V.N., Dubinker Yu.B. et al. Thermal conductivity of the systems such as organosilicon elastomer – powdered mineral filler. *IFZh* [Journal of Engineering Physics and Thermophysics], 1972, vol. 23, no. 3. Available at: <http://www.viam.ru/public>.
10. Mikheev V.A., Sulaberidze V.Sh., Mushenko V.D. Study on thermal conductivity of composite materials based on silicone with fillers. *Izvestiya vuzov. Priborostroyeniye* [Journal of Instrument Engineering], 2015, vol. 58, no. 7, pp. 167–172. (In Russ.)
11. Mikheev V.A., Sulaberidze V.Sh. Calculation and experimental studies of effective thermal conductivity of composite materials based on polymers. *Mir izmereniy* [The World of Measurements], no. 3 (175), 2017, pp. 26–28. (In Russ.)
12. Agrawal A., Satapathy A. Mathematical model for evaluating effective thermal conductivity of polymer composites with hybrid fillers. *Intern. J. of Thermal Sciences*. 89, 203–209 (2015).
13. Xua J., Gaoa B., Dua H., Kanga F. A statistical model for effective thermal conductivity of composite materials. *Intern. J. of Thermal Sciences*. 104, 348–356 (2016).
14. Xu J. Z., Gao B. Z., Kang F. Y. A reconstruction of Maxwell model for effective thermal conductivity of composite materials. *Applied Thermal Engineering*. 102, 6, 972–979 (2016).

Поступила 14.11.2020; принята к публикации 08.12.2020; опубликована 25.12.2020  
Submitted 14/11/2020; revised 08/12/2020; published 25/12/2020

**Сулаберидзе Владимир Шалвович** – доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия. Email: [sula\\_vlad@mail.ru](mailto:sula_vlad@mail.ru)

**Скорнякова Елизавета Алексеевна** – кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия. Email: [elizavetasesina@mail.ru](mailto:elizavetasesina@mail.ru)

**Vladimir Sh. Sulaberidze** – DrSc (Eng.), Senior Research Associate, Professor, Department of Metrological Support of Innovative Technologies and Industrial Safety, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia. Email: [sula\\_vlad@mail.ru](mailto:sula_vlad@mail.ru)

**Elizaveta A. Skorniakova** – PhD (Eng.), Associate Professor, Department of Metrological Support of Innovative Technologies and Industrial Safety, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia. Email: [elizavetasesina@mail.ru](mailto:elizavetasesina@mail.ru)

# ЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИИ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ

## METALLURGICAL POWER ENGINEERING, ENERGY SAVING AND ELECTRICAL SYSTEMS

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.31

DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-4-65-70



### РАСЧЁТ ДОЛИ РЕГУЛИРУЮЩЕГО ЭФФЕКТА НАГРУЗКИ В ОТКЛОНЕНИИ НАПРЯЖЕНИЯ НА РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ШИНЕ

Нигаматуллин Р.М.

АО «Магнитогорскгражданпроект», Магнитогорск, Россия

**Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы).** Актуальность проведенных в статье исследований диктуется ужесточением требований к качеству электроэнергии (КЭ) в последнее время. При этом нагрузка является одним из факторов, влияющих на основные показатели качества: отклонения напряжения и частоты сети от их номинальных значений. Целью настоящей работы является оценка доли регулирующего эффекта нагрузки (РЭН) в отклонении напряжения на примере распределительной шины электроприёмников промышленного объекта – насосной станции. **Используемые методы.** Для достижения поставленной цели были проведены расчёты параметров смоделированной части системы электроснабжения предприятия чёрной металлургии (ПАО «ММК»), имеющего в своём составе собственные источники электроэнергии, в программном комплексе «КАТРАН» (Комплекс автоматизированного режимного анализа). **Новизна.** Предложен новый подход в оценке влияния регулирующего эффекта нагрузки на параметры режима и показатели качества электроэнергии через расчёт доли регулирующего эффекта нагрузки в отклонении напряжения сети. Был составлен алгоритм для оптимизации режима с учётом статических характеристик нагрузки, суть которого состоит в определении положительного либо отрицательного регулирующего эффекта нагрузки и степени его влияния на отклонение напряжения сети с последующей выдачей рекомендаций. **Результат.** В ходе исследования получены процентные доли регулирующего эффекта нагрузки в отклонении напряжения при различной длине питающего кабеля. Также на основании полученных расчётов было выявлено, что с увеличением удалённости электрической нагрузки от источника электроэнергии влияние регулирующего эффекта нагрузки на отклонение напряжения сети возрастает. **Практическая значимость.** Предложенный подход может быть использован для оценки влияния статических характеристик нагрузки (СХН) на основные показатели качества электроэнергии и последующих рекомендаций по оптимизации параметров режима электрических систем по условию минимума отклонения напряжения сети.

**Ключевые слова:** регулирующий эффект нагрузки, статические характеристики нагрузки, качество электроэнергии, отклонение напряжения, режим.

© Нигаматуллин Р.М., 2020

#### Для цитирования

Нигаматуллин Р.М. Расчёт доли регулирующего эффекта нагрузки в отклонении напряжения на распределительной шине // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №4. С. 65–70. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-4-65-70>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

# CALCULATION OF A SHARE OF THE LOAD REGULATING EFFECT IN THE DISTRIBUTION BUSBAR VOLTAGE DEVIATION

Nigamatullin R.M.

JSC Magnitogorsk Civil Design Company, Magnitogorsk, Russia

**Abstract. Problem Statement (Relevance):** The relevance of the research carried out and described in the paper is defined by setting the stricter requirements for the quality of electricity (QE) in recent years. At the same time, load is one of the factors that affect the main quality indicators: deviations of the mains voltage and frequency from their nominal values. **Objectives:** The research is aimed at assessing the share of the load regulating effect (LRE) in the voltage deviation by the example of the distribution bus of electrical receivers of an industrial facility: a pumping station. **Methods Applied:** To achieve this goal, the KATRAN software package (automated mode analysis complex) was applied to calculate the parameters of the simulated part of the power supply system of the iron and steel works (PJSC MMK), which has its own electric power sources. **Originality:** A new approach is proposed to assess the influence of the load regulating effect on the mode parameters and power quality indicators by calculating the share of the load regulating effect in the mains voltage deviation. An algorithm was developed to optimize the mode in view of static load characteristics. It focuses on determining positive or negative load regulating effect and the degree of its influence on the mains voltage deviation, and giving relevant recommendations. **Findings:** The research described percentage shares of the load regulating effect in the voltage deviation at various lengths of supply cables. The calculation showed that when increasing the distance between electric load and the source of electric power, the influence of the load regulating effect on the mains deviation increased. **Practical Relevance:** The proposed approach may be used to assess the influence of static load characteristics (SLC) on the main indicators of electric power quality and subsequent recommendations for optimizing the parameters of the electrical system mode by the condition of the minimum mains voltage deviation.

**Keywords:** load regulating effect, static load characteristics, electric power quality, voltage deviation, operating mode.

## For citation

Nigamatullin R.M. Calculation of a Share of the Load Regulating Effect in the Distribution Busbar Voltage Deviation. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020, vol. 18, no. 4, pp. 65–70. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-4-65-70>

## Введение

На уровень напряжения узла сети влияют два фактора: мощность источников и мощность нагрузки, питаемой от данного узла. При этом видимая степень влияния нагрузки на этот параметр может быть нулевой только в том случае, если шина нагрузки будет совпадать с шиной генераторного напряжения и система возбуждения синхронных генераторов будет поддерживать напряжение на номинальном уровне. В остальных случаях она будет ненулевой, поскольку присутствуют потери напряжения в элементах сети, способных вносить также свои коррективы в установившийся режим [1].

В существующих научных трудах, посвящённых регулируемому эффекту нагрузки, производятся оценка статических характеристик нагрузки различных потребителей и оценка их влияния на параметры режима [2–9]. Однако не рассмотрено влияние СХН непосредственно на показатели качества электроэнергии, значительно влияющих на нормальную работу электрического оборудования [10]. В связи с этим в данной статье предлагается оценить влияние РЭН

на отклонение напряжения в узле промышленной нагрузки посредством расчёта процентной доли РЭН в  $\delta U$ .

Проведенный в работе эксперимент был проделан в программном комплексе «КАТРАН» [11–13], предназначенном для расчёта режимов промышленных систем электроснабжения с собственными источниками электроэнергии.

## Полученные результаты и их обсуждение

В программе «КАТРАН» была смоделирована система, состоящая, главным образом, из электростанции, шины генераторного напряжения, питающего кабеля, распределительной шины и двигательной нагрузки (рис. 1). Она соответствует реальному объекту: Центральная электростанция ПАО «ММК» (ЦЭС) мощностью 216 МВт и питающаяся от неё насосная станция 1А ЦВС с установленной мощностью 14,6 МВт. Потребитель располагает девятью синхронными и двумя асинхронными двигателями по 10 кВ. СД работают в режиме перевозбуждения, вырабатывая реактивную мощность в сеть. Длина кабеля соответствует расстоянию между шиной нагрузки и шиной генераторов ЦЭС.

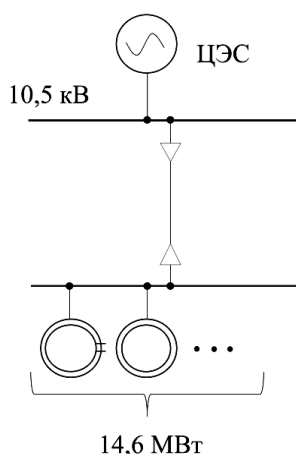


Рис. 1. Исследуемая система  
Fig. 1. The system under study

Далее в программе были получены напряжения исследуемого узла нагрузки с учётом и без учёта регулирующего эффекта двигателей при различной удаленности их от источника и подсчитана процентная доля РЭН в отклонении напряжения на распределительной шине через соотношение:  $\left| \frac{\Delta U}{\delta U} \right| \cdot 100\%$ . Здесь  $\Delta U$  – разность между напряжениями с учётом и без учёта статических характеристик нагрузки:

$$\Delta U = U_{\text{с уч. СХН}} - U_{\text{без уч. СХН}},$$

где  $U_{\text{с уч. СХН}}$  – напряжение с учётом статических характеристик нагрузки, кВ;

$U_{\text{без уч. СХН}}$  – напряжение без учёта статических характеристик нагрузки, кВ.

$\delta U$  – отклонение напряжения в абсолютных единицах.

$$\delta U = U_{\text{ф}} - U_{\text{ном}},$$

где  $U_{\text{ф}}$  – фактическое напряжение, кВ;

$U_{\text{ном}}$  – номинальное напряжение, кВ.

Фактическое напряжение соответствует рассчитанному в программе напряжению с учётом регулирующего эффекта нагрузки, поэтому принимаем  $U_{\text{ф}} = U_{\text{с уч. СХН}}$ . Подставляя их в соотношение, взятое по модулю, получим:

$$\left| \frac{\Delta U}{\delta U} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{U_{\text{с уч. СХН}} - U_{\text{без уч. СХН}}}{U_{\text{с уч. СХН}} - U_{\text{ном}}} \right| \cdot 100\%.$$

Наглядно разницу между  $\Delta U$  и  $\delta U$  мы можем увидеть на графике (рис. 2).

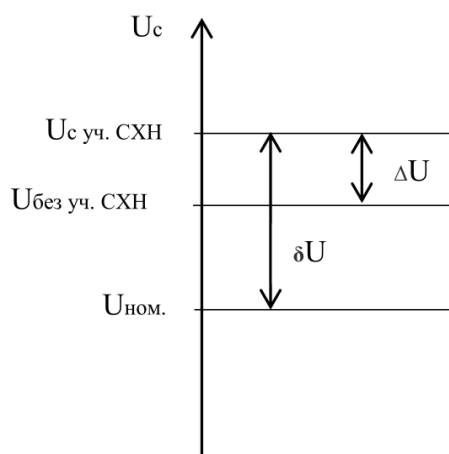


Рис. 2. Разница между  $\Delta U$  и  $\delta U$   
Fig. 2. Difference between  $\Delta U$  and  $\delta U$

Результаты проведенного эксперимента приведены в **таблице**.

Таблица. Результаты эксперимента, проведенного в программе «КАТРАН»

Table. Results of the experiment conducted in KATRAN

S, км	$U_{\text{с уч. СХН}}, \text{ кВ}$	$U_{\text{без уч. СХН}}, \text{ кВ}$	$\left  \frac{\Delta U}{\delta U} \right  \cdot 100\%$
0,1	12,15	12,07	3,72
0,2	11,99	11,91	4,00
0,3	11,82	11,74	4,40
0,4	11,66	11,57	5,42
0,5	11,48	11,4	5,41
0,6	11,31	11,21	7,63
0,7	11,12	11,03	8,00
0,8	10,93	10,83	10,75
0,9	10,7	10,43	38,57
1,0	10,11	9,65	100

Примечание. Если  $\Delta U > \delta U$ , то доля регулирующего эффекта нагрузки в отклонении напряжения принимается равной 100%.

Как видно из таблицы, доля (влияние) РЭН в отклонении напряжения возрастает с увеличением длины кабеля (наглядно на гистограмме на рис. 3). При длине 1 км она составляет 100%. Данный подход позволяет нам оценить степень влияния СХН на отклонение напряжения сети и вычислить процентную долю этого влияния. Опираясь на расчётные данные, можно также предложить методы по снижению влияния отрицательного регулирующего эффекта нагрузки на параметры режима путём, например, внедрения частотного регулирования двигательной нагрузки, сводящего, как правило, РЭН практически к нулю.

Согласно последним нормативам, предельно допустимое отклонение напряжения сети составляет 10% от  $U_{ном}$ . В нашем случае регулирующий эффект двигателей насосной станции оказывает отрицательное влияние на  $\delta U$  распределительной шины, поскольку напряжение с учётом СХН будет отличаться от номинального значения на большую величину, чем напряжение без учёта СХН. Поэтому здесь возникает целесообразность снижения такого нежелательного эффекта нагрузки путём внедрения частотных преобразователей или изменения конфигурации сети. В первом случае параметры двигателей будут зависеть, по большей мере, от параметров самого ПЧ, выходные значения которого практически не изменяются при незначительных колебаниях напряжения или частоты сети, а не от параметров питающей сети.

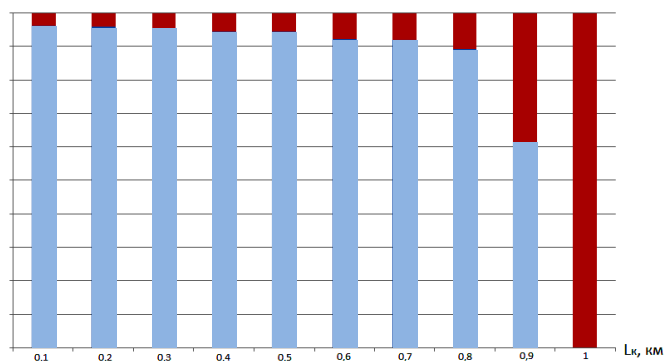


Рис. 3. Доля регулирующего эффекта (красный) в отклонении напряжения

Fig. 3. Percentage of the regulating effect (red) in the voltage deviation

Предложенные расчёты могут использоваться для выдачи рекомендаций по оптимизации режима электроэнергетических систем. Например, по алгоритму (рис. 4).

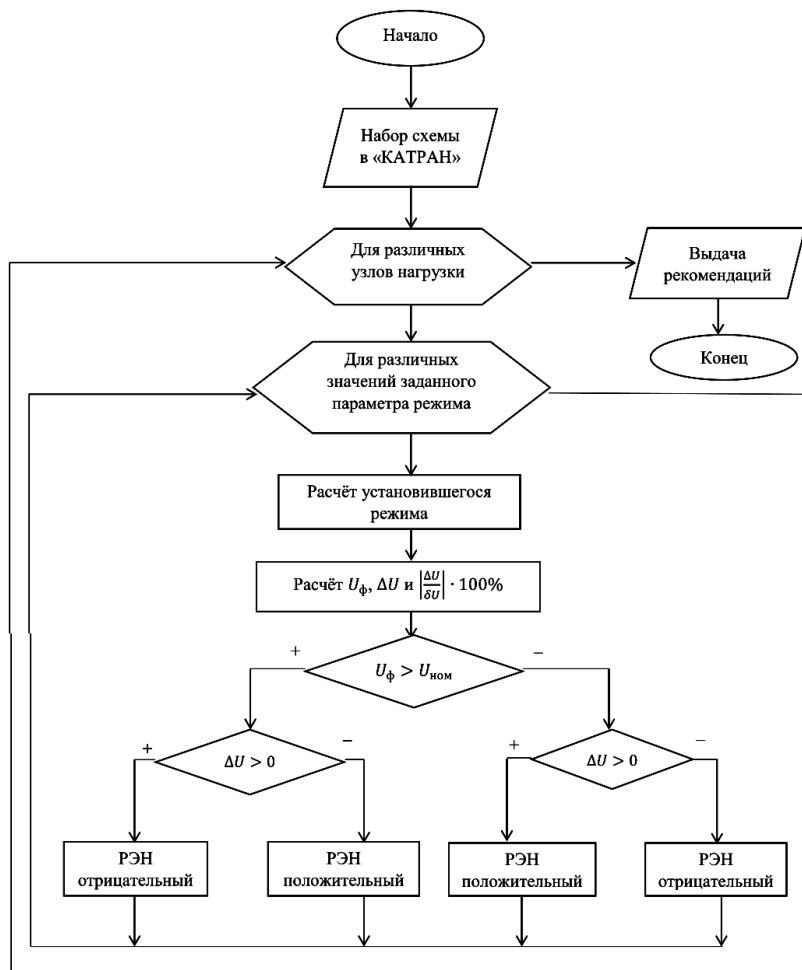


Рис. 4. Алгоритм оптимизации режима электрических систем по статическим характеристикам нагрузки  
Fig. 4. Algorithm for optimizing the mode of electrical systems by static load characteristics



Алгоритм предлагает расчёт степени влияния РЭН на отклонение напряжения различных узлов нагрузки и при различных значениях заданного параметра режима (в нашем случае это была длина питающего кабеля), а также определение положительного либо отрицательного влияния регулирующего эффекта на уровень напряжения сети. При отрицательном РЭН возникает необходимость искусственного снижения негативного влияния нагрузки на напряжение сети. Целесообразность этого снижения можно оценить при помощи расчёта доли регулирующего эффекта в  $\delta U$ . Расчёт по алгоритму был проведён на примере узла нагрузки промышленной насосной станции, в результате которого была выявлена целесообразность снижения РЭН ввиду его отрицательного влияния на уровень питающего напряжения, которая возрастает по ме-

ре увеличения удалённости от источника электроэнергии.

### Заключение

Был рассмотрен новый подход в оценке влияния регулирующего эффекта нагрузки на отклонение напряжения сети посредством расчёта доли РЭН в этом отклонении. Полученные расчёты могут использоваться для оценки целесообразности изменения степени влияния нагрузки на параметры режима. Результаты эксперимента, освещённые в статье, также подтверждают тот факт, что при увеличении удалённости нагрузки от источника влияние источника на напряжение распределительной шины уменьшается, а влияние фактически изменяющейся мощности нагрузки увеличивается.

### Список литературы

1. Нигаматуллин Р.М., Газизова О.В., Малафеев А.В. Исследование влияния регулирующего эффекта нагрузки на уровень напряжения питающей подстанции с учётом мощности короткого замыкания энергосистемы // *Электротехнические системы и комплексы*. 2020. № 2(47). С. 19–25. URL: [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-19-25](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-19-25)
2. Лисунец Н.Л., Соломонов К.Н., Цепин М.А. Объемная штамповка алюминиевых заготовок. М.: Машиностроение, 2009. 171 с.
3. Малафеев А.В., Ефимов С.А., Зайцева Ю.Ю. Влияние регулирующего эффекта нагрузки промышленного предприятия на параметры установившегося режима // *Материалы 65-й науч.-техн. конф. по итогам научно-исследовательских работ за 2006–2007 гг.*: сб. докл. Т.2. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2007. С. 32–34.
4. Оценка регулирующего эффекта выпрямительной нагрузки для определения параметров установившихся режимов систем электроснабжения промышленных предприятий / Н.А. Николаев, О.В. Буланова, А.В. Малафеев, Ю.Н. Кондрашова, В.М. Тарасов // *Изв. вузов. Электромеханика*. 2011. №4. С. 115–118.
5. Панкратов А.В., Полищук В.И., Бацева Н.Л. Экспериментальное определение статических характеристик нагрузки электроэнергетических систем // *Вестник Южно-Уральского государственного университета*. Серия: Энергетика. 2015. №1. С. 11–20.
6. Определение статической характеристики крупных узлов нагрузки / А.В. Паздерин, А.А. Суворов, А.С. Тавлинцев, П.В. Чусовитин, А.В. Юдин // *Научное обозрение*. 2013. №7. С. 77–79.
7. Статические предельные характеристики асинхронного электропривода при частотном векторном управлении / И.Г. Однокопылов, Ю.Н. Дементьев, Ю.В. Крохта, А.Р. Ари, Л.С. Удуд // *Вестник Южно-Уральского государственного университета*. Серия «Энергетика». 2018. Т. 18, №4. С. 109–120.
8. Статические характеристики и методы расчета установившихся режимов работы синхронных двигателей / А.Н. Филатов, Е.Ю. Сизганова, В.И. Пантелеев, Р.А. Петухов, Г.А. Пилюгин // *Журнал Сибирского федерального университета*. 2015. С. 795–801.
9. Влияние отклонения параметров асинхронной машины на её статические характеристики при вентиляторной нагрузке / В.З. Ковалёв, А.Г. Щербаков, О.А. Петухова, А.А. Зябкин // *Омский научный вестник*. 2017. №5. С. 116–125.
10. Влияние отклонения напряжения на потери мощности в электрооборудовании электрических сетей и потребителей / Д.Г. Сафонов, А.Г. Люtareвич, С.Ю. Долингер, С.В. Бирюков // *Омский научный вестник*. 2013. №2. С. 203–206.
11. Газизова О.В., Кондрашова Ю.Н., Малафеев А.В. Повышение эффективности управления режимами электростанций промышленного энергоузла за счет прогнозирования статической и динамической устойчивости при изменении конфигурации сети // *Электротехнические системы и комплексы*. 2016. №3(32). С. 27–38.
12. Газизова О.В., Соколов А.П., Малафеев А.В. К вопросу учета насыщения в математической модели промышленного генератора для расчета переходных режимов в системе электроснабжения сложной конфигурации // *Электротехнические системы и комплексы*. 2018. №1(38). С. 40–47.
13. Пат. 2019610251 Российская Федерация. Комплекс автоматизированного режимного анализа КАТРАН 10.0 / В.А. Игуменцев, М.А. Малафеев, Е.А. Панова, А.В. Варганова, О.В. Газизова, Ю.Н. Кондрашова,

В.В. Зиновьев, А.И. Юлдашева, А.А. Крубцова, Н.А. Анисимова, А.Т. Насибуллин, М.А. Трemasов, В.С. Щербакoвa, В.К. Богущ; заявитель и патентoобладатель ФГБОУ ВО «МГТУ им. Нoсoвa». № 2018661952; заявл. 29.10.2018; oпyбл. 10.01.2019.

## References

1. Nigmatullin R.M., Gazizova O.V., Malafeev A.V. Study of the influence of the load regulating effect on the voltage level of the supply substation, taking into account short-circuit power of the power system. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes]. 2020, no. 2(47), pp. 19–25. URL: [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-19-25](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-19-25)
2. Lisunets N.L., Solomonov K.N., Tsepin M.A. *Obemnaya shtampovka alyuminievykh zagotovok* [Die forging of aluminum billets]. Moscow: Mashinostroenie, 2009, 171 p. (In Russ.)
3. Malafeev A.V., Efimov S.A., Zaitseva Yu.Yu. Influence of the load regulatory effect of the industrial enterprise on the parameters of the steady-state mode. *Materialy 65-y nauch.-tekhn. konf. po itogam nauchno-issledovatel'skikh rabot za 2006–2007 gg.* [Proceedings of the 65th Scientific and Technical Conference according to the results of scientific research for 2006–2007: abstracts]. Magnitogorsk: NMSTU, 2007, vol. 2, pp. 32–34. (In Russ.)
4. Nikolaev N.A., Bulanova O.V., Malafeev A.V., Kondrashova Yu.N., Tarasov V.M. Assessing rectifier load regulatory effect to determine the parameters of the established modes of power supply systems of industrial enterprises. *Izv. vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of Higher Education Institutions. Russian Electromechanics], 2011, no. 4, pp. 115–118. (In Russ.)
5. Pankratov A.V., Polishchuk V.I., Batseva N. L. Experimental determination of static load characteristics of electric power systems. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering], 2015, no. 1, pp. 11–20. (In Russ.)
6. Pazderin A.V., Suvorov A.A., Tavlintsev A.S., Chusovitin P.V., Yudin A.V. Determination of the static characteristics of major load nodes. *Nauchnoe obozrenie* [Scientific Review], 2013, no. 7, pp. 77–79. (In Russ.)
7. Odnokopylov I.G., Dementiev Yu.N., Krokhta Yu.V., Ari A.R., Udut L.S. Static limiting characteristics of the asynchronous electric drive with frequency vector control. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering], 2018, vol. 18, no. 4, pp. 109–120. (In Russ.)
8. Filatov A.N., Sizganova E.Yu., Panteleev V.I., Petukhov R.A., Pilyugin G.A. Static characteristics and methods for calculating steady-state modes of synchronous motors. *Zhurnal Sibirskogo federalnogo universiteta* [Journal of Siberian Federal University], 2015, pp. 795–801. (In Russ.)
9. Kovalev V.Z., Shcherbakov A.G., Petukhova O.A., Zyabkin A.A. Influence of the deviation of asynchronous machine parameters on its static characteristics under fan load. *Omskiy nauchny vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2017, no. 5, pp. 116–125. (In Russ.)
10. Safonov D.G., Lyutarevich A.G., Dolinger S.Yu., Biryukov S.V. Influence of the voltage deviation on power losses in electrical equipment of electric mains and consumers. *Omskiy nauchny vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2013, no. 2, pp. 203–206. (In Russ.)
11. Gazizova O.V., Kondrashova Yu.N., Malafeev A.V. Improving the efficiency of managing the modes of industrial power plants by predicting static and dynamic stability when changing the network configuration. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no. 3(32), pp. 27–38. (In Russ.)
12. Gazizova O.V., Sokolov A.P., Malafeev A.V. On the issue of saturation accounting in the mathematical model of an industrial generator for calculating transient modes in the power supply system of a complex configuration. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 1(38), pp. 40–47. (In Russ.)
13. Igumenshchev V.A., Malafeev M.A., Panova E.A., Varganova A.V., Gazizova O.V., Kondrashova Yu.N., Zinoviev V.V., Yuldasheva A.I., Krubtsova A.A., Anisimova N.A., Nasibullin A.T., Tremasov M.A., Shcherbakova V.S., Bogush V.K. *Kompleks avtomatizirovannogo rezhimnogo analiza KATRAN 10.0* [KATRAN 10.0 automated mode analysis software]. Software Registration Certificate of the Russian Federation, no. 2019610251, applied on 29.10.2018; published on 09.01.2019.

Пoстyпила 07.11.2020; принята к публикации 08.12.2020; oпyбликoвaнa 25.12.2020  
Submitted 07/11/2020; revised 08/12/2020; published 25/12/2020

**Нигаматуллин Руслан Миратович** – инженер,  
АО «Магнитогорскгражданпроект», Магнитогорск, Россия.  
Email: nigmatullin\_ruslan@mail.ru. ORCID 0000-0003-3236-9358

**Ruslan M. Nigmatullin** – Engineer,  
JSC Magnitogorsk Civil Design Company, Magnitogorsk, Russia.  
Email: nigmatullin\_ruslan@mail.ru. ORCID 0000-0003-3236-9358

# МЕЖДУНАРОДНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ INTERNATIONAL ACTIVITIES

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 061.3:621.7

DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-4-71-75



## ЮБИЛЕЙНАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ МОЛОДЕЖНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «MAGNITOGORSK ROLLING PRACTICE 2020»

Корчунов А.Г.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

**Аннотация.** Молодые ученые в области обработки металлов и сплавов давлением России, стран СНГ, Европы и Азии приняли участие в юбилейной V международной научно-практической конференции «Magnitogorsk Rolling Practice 2020». В этом году форум проводился в статусе победителя конкурса Российского фонда фундаментальных исследований на лучшие проекты организации научных мероприятий на территории Российской Федерации. За время работы конференция собрала на своих виртуальных сессиях более 100 участников из 32 университетов, промышленных предприятий и научно-исследовательских организаций. Программа конференции включала доклады молодых ученых в тематических секциях, мастер-класс «Основы конечно-элементного компьютерного моделирования в Abaqus» и персональные консультации по проблемам научных исследований молодых специалистов. По итогам конференции были определены победители и призеры конкурса на лучший научный доклад и присуждены номинации «Старт в науку», «Лучший прогресс в исследованиях», «Лучшая практическая реализация» и «Лучшее моделирование».

**Ключевые слова:** международная молодежная конференция, обработка давлением, металлы, сплавы, обмен опытом, исследования, инновации, моделирование.

*Конференция проводилась при финансовой поддержке ФГБУ «Российский фонд фундаментальных исследований» (Договор № 20-08-20004\20).*

© Корчунов А.Г., 2020

### Для цитирования

Корчунов А.Г. Юбилейная международная молодежная научно-практическая конференция «Magnitogorsk Rolling Practice 2020» // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №4. С. 71–75. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-4-71-75>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

ANNIVERSARY INTERNATIONAL YOUTH SCIENTIFIC AND PRACTICAL  
CONFERENCE MAGNITOGORSK ROLLING PRACTICE 2020

Korchunov A.G.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

**Abstract.** Young researchers in the field of metal and alloy forming from Russia, countries of the CIS, Europe and Asia took part in the fifth anniversary international scientific and practical conference *Magnitogorsk Rolling Practice 2020*. This year the forum had a title of the winner of the competition held by the Russian Foundation for Basic Research for the best projects of organizing scientific events in the Russian Federation. In the course of the conference, over 100 participants from 32 universities, industrial plants and research institutions were present in the virtual sessions. The conference program included reports delivered by young researchers in the relevant sessions, the workshop devoted to “Basics of finite element modeling in Abaqus”, and individual consultations on the difficulties of research of young specialists. Following the final results of the conference, the committee determined the diploma and prize winners of the competition for the best scientific report and awarded the nominations, such as “The best start to science”, “The best progress in research”, “The best practical implementation” and “The best numerical simulation”.

**Keywords:** international youth conference, metal forming, metals, alloys, sharing experience, research, innovations, simulation

*The conference was funded by the Russian Foundation for Basic Research (Contract No. 20-08-20004\20).*

**For citation**

Korchunov A.G. Anniversary International Youth Scientific and Practical Conference Magnitogorsk Rolling Practice 2020. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020, vol. 18, no. 4, pp. 71–75. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-4-71-75>

**Введение**

В ноябре 2020 г. состоялась юбилейная V международная молодежная научно-практическая конференция «**Magnitogorsk Rolling Practice 2020**», посвященная вопросам обработки металлов и сплавов давлением.

С инициативой проведения международного молодежного форума, посвященного обсуждению фундаментальных и прикладных вопросов обработки металлов и сплавов давлением, выступили в 2014 г. ученые Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова [1]. Идея организации молодежной научно-практической конференции нашла живой отклик ученых, специалистов и студентов. Актуальность тематики конференции подтверждена расширением географии участников и постоянной поддержкой ее проведения Российским фондом фундаментальных исследований (РФФИ) [2]. Многие молодые ученые, представлявшие свои научные разработки на предыдущих конференциях, подготовили и успешно защитили диссертации кандидатов технических наук. Общение на полях конференции придало импульс к укреплению сотрудничества между молодыми учеными ведущих научных школ, формированию новых науч-

ных коллективов, способных решать самые амбициозные задачи [3].

В этом году конференция проводилась в статусе победителя конкурса РФФИ на лучшие проекты организации научных мероприятий на территории Российской Федерации\*.

В связи с текущей эпидемиологической ситуацией оргкомитет конференции принял решение о проведении конференции в дистанционном формате.

Программа конференции включала доклады молодых ученых в тематических секциях «Инновационные технологии и материалы обработки металлов давлением», «Кроссдисциплинарные решения современного инжиниринга материалов (iSmart-MetalForming)» и «Фундаментальные проблемы обработки металлов давлением в контексте современных потребностей мировой промышленности», мастер-класс «Основы конечно-элементного компьютерного моделирования в Abaqus» и персональные консультации по проблемам научных исследований молодых специалистов.

Конференция собрала на своих виртуальных сессиях более 100 участников из 32 университетов, промышленных предприятий и научно-исследовательских организаций России, Казах-



стана, Беларуси, США, Индии, Италии, Китая и Норвегии. Суммарное онлайн-время конференции составило более 20 часов.

Информационными партнерами конференции выступали журналы «ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ. Бюллетень научно-технической и экономической информации», «Черные металлы», «CIS Iron and Steel Review», «Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова», «Теория и технология металлургического производства», «Механическое оборудование металлургических заводов».

С приветственным словом к участникам конференции обратились члены программного комитета Пунит Тандон (Индийский институт информационных технологий, проектирования и производства, г. Джабалпур, Индия), Ирене Каллиари (Падуанский университет, г. Падуа, Италия), Мегуми Кавасаки (Университет штата Орегон, США).

В своих выступлениях они подчеркнули важность проведения конференции в условиях непростой эпидемиологической ситуации, отметили хорошую возможность молодым ученым различных научных школ обменяться опытом и знаниями, что стимулирует развитие перспективных научных направлений. Отдельно была подчеркнута необходимость докладов на английском языке, что позволит активно участвовать в международных конференциях самого высокого уровня.

В секционных заседаниях были заявлены доклады молодых ученых ведущих научных школ в области обработки металлов и сплавов давлением из Московского института стали и сплавов (г. Москва), Сибирского федерального университета (г. Красноярск), Уральского федерального университета (г. Екатеринбург), Южно-Уральского государственного университета (г. Челябинск), Института физики металлов им. М.Н. Михеева Уральского отделения РАН (г. Екатеринбург), Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, ОАО «РОСНИТИ» (г. Челябинск), Карагандинского государственного индустриального университета (г. Темиртау, Казахстан), Рудненского индустриального института (г. Рудный, Казахстан), Экибастузского инженерно-технического института им. академика К. Сатпаева (г. Экибастуз, Казахстан), Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого (г. Гомель, Беларусь), Падуанского университета (г. Падуа, Италия), Ин-

дийского университета информационных технологий, дизайна и производства (г. Джабалпур, Индия). Рабочие сессии проводились преимущественно на английском языке.

Молодые ученые Норвежского университета науки и технологии (г. Тронхейм, Норвегия), Центрального Южного университета (г. Чанша, Китай), Индийского института технологий Бомбея (г. Мумбай, Индия), Назарбаев Университета (г. Нур-Султан, Казахстан), Полоцкого государственного университета (г. Новополоцк, Беларусь), Тольяттинского государственного университета (г. Тольятти), Всероссийского научно-исследовательского института технической физики имени академика Е. И. Забабахина (г. Снежинск), а также специалисты промышленных предприятий Северского трубного завода (г. Полевской), РУСАЛа (г. Красноярск), Волжского трубного завода (г. Волжский), Новолипецкого металлургического комбината (г. Липецк), Белорецкого металлургического комбината (г. Белорецк), Каменск-Уральского металлургического завода (г. Каменск-Уральск), НПО «Белмаг» (г. Магнитогорск), ООО «Свелен», (г. Санкт-Петербург), ОАО «Магнитогорского калибровочного завода» (г. Магнитогорск) представили результаты своих научных исследований в виде тезисов докладов на английском языке.

Несмотря на не совсем привычный онлайн-формат и достаточно молодой возраст выступающих, доклады носили высокий научный уровень, а докладчики продемонстрировали стремление как можно ярче и выразительнее представить результаты своих научных исследований и проявили себя как вполне созревшие ученые, способные решать сложные задачи в обработке металлов и сплавов давлением.

Тематика докладов молодых ученых свидетельствует о том, что в настоящее время существенный интерес вызывают научные направления, связанные с разработкой:

- конечно-элементных моделей процессов обработки металлов и сплавов давлением в специализированных программных комплексах DEFORM 3D, Abaqus и др.;
- инновационных процессов холодной и горячей обработки металлов давлением;
- новых материалов с повышенным уровнем эксплуатационных характеристик;
- новых методик определения истинного сопротивления металлов и сплавов деформации;
- физического моделирования процессов обработки металлов и сплавов давлением.





Таким образом, можно говорить о большой вовлечённости молодых учёных, специалистов, студентов и аспирантов к созданию и внедрению инновационных разработок, имеющих фундаментальное и прикладное значение для развития потенциала индустрии обработки металлов и сплавов давлением, его расширения и диверсификации, что позволяет успешно решать производственные вопросы через эффективную связь науки и производства.

По итогам работы секций были определены номинанты, призеры и победитель конференции.

Обладателями номинации «Старт в науку» стали сразу трое молодых ученых: Никита Буниц (Московский институт стали и сплавов, г. Москва), Александра Тымченко (Карагандинский государственный индустриальный университет, г. Темиртау, Казахстан) и Илья Цырганович (Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого, г. Гомель, Беларусь). Номинации «Лучший прогресс в исследованиях» удостоена Екатерина Устинова (Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия). Номинацией «Лучшая практическая реализация» был награжден Денис Ворошилов (Сибирский федеральный университет, г. Красноярск). Номинация «Лучшее моделирование» была присуждена Денису Салихянову (Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург).

Дипломом 3-й степени были награждены Никита Заварцев (ОАО «РОСНИТИ», г. Челябинск, Россия) за доклад «Исследование влияния температуры нагрева на технологическую пластичность стали марки 15X13H2 применительно к процессу винтовой прокатки» и Олеся Бирюкова (Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия) за доклад «Разработка технологии асимметричной прокатки алюминиевых сплавов». Диплома 2-й степени удостоен Лука Пеццато (Падуанский университет, г. Падуа, Италия) за доклад «Технология обработки магниевого сплава AZ61 методом экструзии с большой деформацией для биомедицинского применения».

Победителем конференции с вручением Диплома 1-й степени был признан Михаил Ерпалов (Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия) за доклад «Теоретический и экспериментальный анализ профиля шейкообразования цилиндрических образцов».

Лучшие выступления молодых ученых были отмечены приглашением к публикации в журналах – информационных партнерах конференции, индексируемых в наукометрической системе Scopus, а также входящих в Перечень ведущих российских рецензируемых научных изданий.

По итогам работы был издан сборник материалов трудов конференции на английском языке.

ке. Подробнее с итогами конференции можно познакомиться на сайте: <http://mrp.magtu.ru>

Участники поблагодарили организаторов за очень высокий профессиональный уровень конференции, за продуманную повестку, четкую организацию ее работы в дистанционных условиях, выразили уверенность, что у этого молодежного научного форума долгое и успешное будущее.

В свою очередь, организаторы представили проектную программу проведения следующей конференции, которая сочетает в себе достоинства мероприятий в очном формате с применением лучших практик онлайн-технологий.

В планах были обозначены пленарная сессия с приглашением ведущих ученых с мировым именем в области обработки металлов и сплавов давлением, расширение программы промышленных туров на промышленные предприятия, презентация уникального комплекса асимметричной прокатки и инкрементальной штамповки международной лаборатории «Механика градиентных наноматериалов», посещение горнолыжных центров вблизи г. Магнитогорска.

На этом конференция завершила свою работу, а ее участники договорились встретиться на VI международной молодежной научной конференции «**Magnitogorsk Rolling Practice**».

### Список литературы

1. Чукин М.В., Корчунов А.Г., Тулупов О.Н. Международные проекты Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова // Заготовительные производства в машиностроении. 2019. №6. С. 243–245.
2. Корчунов А.Г. Международная молодежная научно-практическая конференция *Magnitogorsk Rolling Practice 2018* в Магнитогорском государственном техническом университете им. Г.И. Носова // Черные металлы. 2018. № 9. С. 6–8.
3. Korchunov A. *Magnitogorsk Rolling Practice 2019: the benchmark for young scientists from around the world* // CIS Iron and Steel Review. 2019. Vol. 17, pp. 70–72.

### References

1. Chukin M.V., Korchunov A.G., Tulupov O.N. International projects of Nosov Magnitogorsk State Technical University. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii* [Blanking Production in Mechanical Engineering], 2019, no. 6, pp. 243–245. (In Russ.)
2. Korchunov A.G. International Youth Scientific and Practical Conference *Magnitogorsk Rolling Practice 2018* held at Nosov Magnitogorsk State Technical University. *Chernye metally* [Ferrous Metals], 2018, no. 9, pp. 6–8. (In Russ.)
3. Korchunov A. *Magnitogorsk Rolling Practice 2019: the benchmark for young scientists from around the world*. CIS Iron and Steel Review. 17 (2019), 70–72.

Поступила 02.12.2020; принята к публикации 08.12.2020; опубликована 25.12.2020  
Submitted 02/12/2020; revised 08/12/2020; published 25/12/2020

**Корчунов Алексей Георгиевич** – доктор технических наук, проректор по международной деятельности, председатель Оргкомитета конференции «*Magnitogorsk Rolling Practice*», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: [international@magtu.ru](mailto:international@magtu.ru). ORCID 0000-0002-2844-8283

**Alexey G. Korchunov** – DrSc (Eng.), Vice Rector for International Affairs, Chairman of the Organizing Committee of the *Magnitogorsk Rolling Practice* conference, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: [international@magtu.ru](mailto:international@magtu.ru). ORCID 0000-0002-2844-8283

---

## УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

Мы приглашаем Вас к участию в нашем журнале в качестве авторов, рекламодателей и читателей.

Журнал формируется по разделам, отражающим основные направления научной деятельности ученых МГТУ, в частности:

- РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ.
- МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ.
- ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ.
- ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО.
- ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ.
- МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ.
- СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ.
- МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.
- НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ.
- ЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИИ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ.
- УПРАВЛЕНИЕ, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕТАЛЛУРГИИ.
- СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И СТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕТАЛЛУРГИИ.
- ЭКОЛОГИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ.
- ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И РЫНОК ПРОДУКЦИИ.
- СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ, ПОДГОТОВКА И ОБУЧЕНИЕ СПЕЦИАЛИСТОВ.
- ИНФОРМАЦИЯ И ДР.

---

## ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ, ПРИНИМАЕМЫМ К ПУБЛИКАЦИИ

### 1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СТАТЬИ (на русском и английском языках)

**1.1. Наименование статьи** (не более 15 слов). Должно кратко отражать содержание статьи. Не рекомендуется использовать сокращения и аббревиатуры.

**1.2. Аффiliation.** Указывается фамилия, имя, отчество авторов (транслитерация), ученая степень, звание, должность, индивидуальный авторский идентификатор ORCID, полное название организации (ее официально принятый английский вариант), адрес электронной почты хотя бы одного из авторов.

**1.3. Аннотация** (200–250 слов). Включает постановку задачи (актуальность работы), цель, используемые методы (эксперименты), новизну, результаты, практическую значимость (направления развития).

**Онлайн-перевод запрещается!**

**1.4. Ключевые слова:** от 5 до 15 основных терминов.

### 2. СТРУКТУРА ОСНОВНОЙ ЧАСТИ СТАТЬИ

**2.1. Введение** (постановка проблемы).

**2.2. Теория, материалы и методы исследования, технические и технологические разработки.**

**2.3. Результаты исследования и их обсуждение.**

**2.4. Заключение** (выводы).

**2.5. Список литературы** (на русском и английском языках).

### 3. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЬИ

**3.1.** Рекомендуемый объем статьи – 6–8 страниц.

**3.2.** Текст статьи, сведения об авторах, аннотация, ключевые слова и список литературы представляются на электронном носителе в виде файла, созданного средствами **Microsoft Word**, и распечаткой на стандартных листах бумаги формата А4.

При наборе статьи в **Microsoft Word** рекомендуются следующие установки:

- **шрифт** – **Times New Roman**, размер – 11 пт, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;

- при вставке **формул** использовать встроенный редактор формул **Microsoft Equation** со стандартными установками, применяется только сквозная нумерация;

- **иллюстрации** не должны превышать ширины колонки (80 мм) или ширины страницы (170 мм). Для подписей элементов на иллюстрации используется шрифт TimesNewRoman 11 пт. Рисунки представляются в редакцию в двух форматах: редактируемом и нередатируемом (\*.jpg; качество не менее 300 dpi). В тексте статьи должны быть подрисуночные подписи в местах размещения рисунков. В конце подписи к рисунку точка не ставится. Например:

Рис. 4. Расчётная зависимость  $\gamma(t)=I_{nt}/I_{n0}$  от времени и удалённости КЗ от выводов асинхронного двигателя

- **таблицы** нумеруются, если их число более одной. Заголовок необходим, когда таблица имеет самостоятельное значение, без заголовка дают таблицы вспомогательного характера.

**3.3.** При подготовке рукописи необходимо руководствоваться Международной системой единиц **СИ**.

### 4. ДОКУМЕНТЫ, ПРИЛАГАЕМЫЕ К СТАТЬЕ

**4.1. Экспертное заключение** о возможности опубликования.

**4.2. Договор.**

---

**Внимание!** Публикация статей является бесплатной. Преимущество опубликования предоставляется авторам и учреждениям, оформившим подписку на журнал.

Статьи проходят обязательное научное рецензирование.

Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям.

По вопросам публикации статей обращаться: 455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Редколлегия журнала «Вестник МГТУ им. Г.И. Носова», М.В. Чукину.

Телефоны: (3519) 29-85-26, 22-14-93.

Email: rio\_mgtu@mail.ru; vestnik@magtu.ru (с указанием темы сообщения «Вестник МГТУ»).