

## ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ КОНЦЕНТРАТОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НАГРУЗКИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЫСОТЫ ШТАБЕЛЯ

В. Д. Кантемиров<sup>1</sup>, Р. С. Титов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук,  
Екатеринбург, Россия

**Аннотация:** Приведены результаты лабораторных экспериментальных исследований по моделированию процесса уплотнения титаномагнетитового концентрата под действием нагрузки. Установлено, что под воздействием приложенных нагрузок твердые частицы дисперсного материала (концентрата) практически не уплотняются. Уплотнение концентрата происходит за счет сокращения (или полного удаления) из него газообразной или жидкой фазы. Удаление жидкой фазы связано с фильтрацией воды и может происходить только при длительном, измеряемом месяцами действии уплотняющей нагрузки (консолидации). Кратковременное действие нагрузки (часы, сутки) приводит к уплотнению концентрата за счет удаления газообразной фазы, а жидкая фаза не отфильтровывается из концентрата. Пределом уплотнения концентрата от кратковременно действующей нагрузки является полное удаление газообразной фазы и превращение материала из трехфазной системы в двухфазную («твердая-жидкая»). Установлен нелинейный характер изменения плотности концентрата в штабеле в зависимости от нагрузки, эквивалентной высоте вышележащего слоя этого концентрата. Полученные результаты исследований позволяют оценить изменение насыпной плотности концентратов в зависимости от степени наполнения складов, что имеет большое значение при составлении технологического и товарного балансов обогатительной фабрики.

**Ключевые слова:** плотность, железорудный концентрат, коэффициент фильтрации, штабель, нагрузка, высота слоя, коэффициент сжимаемости, уплотнение, осадка.

**Благодарность:** Статья подготовлена по материалам НИР, выполняемой по программе ФНИ государственных академий наук Тема 1 – Методы учета переходных процессов технологического развития при освоении глубокозалегающих сложно-структурных месторождений полезных ископаемых. (№0405–2019–0005).

**Для цитирования:** Кантемиров В. Д., Титов Р. С. Оценка изменения плотности железорудных концентратов под действием нагрузки в зависимости от высоты штабеля // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 5–1. – С. 178–191. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_51\_0\_178.

### Estimation of changes in density of iron ore concentrates under the effect of load versus height of stock piles

V. D. Kantemirov<sup>1</sup>, R. S. Titov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Mining Ural branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

**Abstract:** The article presents the results of laboratory tests on modeling the process of titanomagnetite concentrate compaction under loading. It is found that under the influence of applied loads, dispersed solid particles (concentrate) practically do not compact. The concentrate is compacted due to reduction (or complete removal) of gaseous or liquid phase from it. Removal of the liquid phase is associated with water seepage and can only occur if the compaction load (consolidation) is applied for a long time measured in months. The short-term load effect (hours, days) leads to compaction of the concentrate owing to removal of the gaseous phase with the liquid phase remaining in the concentrate. The limit of the concentrate compaction under the short-term load effect is the complete removal of the gaseous phase and the transformation of the material from the three-phase system to the two-phase (solid-liquid). The nonlinear nature of changes in the density of the concentrate in a stock pile versus the load equivalent to the height of the overlying layer of this concentrate is established. The obtained research results allow estimating the change in the bulk density of the concentrate depending on stock pile fill, which is of great importance for making-out the process and commercial balances of a processing plant.

**Key words:** density, iron ore concentrate, permeability, stock pile, load, layer height, compressibility coefficient, compaction, slump.

**Acknowledgements:** The article is based on the R&D project implemented within the framework of the Basic Research Program of the Governmental Academies of Sciences, Topic 1: Methods to Take into Account Transient Processes in Mining Deep-Seated Mineral Deposits of Complex Structure, No. 0405-2019-0005.

**For citation:** Kantemirov V. D., Titov R. S. Estimation of changes in density of iron ore concentrates under the effect of load versus height of stock piles. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(5-1):178-191. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_51\_0\_178.

---

## Введение

Учет и контроль весовых показателей исходного минерального сырья и готовой продукции (концентрата) является важной технологической задачей, решаемой в процессе обогащения полезного ископаемого (ПИ). Совокупность данных о физических свойствах перерабатываемого сырья и количестве произведенного концентрата используется при составлении технологического и товарного балансов обогатительной фабрики (ОФ).

В настоящее время учет количества произведенного на ОФ концентрата производится методом маркшейдерской съемки штабелей, размещаемых на складах готовой продукции. Количество концентрата определяется расчетом, с учетом установленного маркшейдерской съемкой объема штабеля и насыпной плотности влажного концентрата по результатам лаборатор-

ных исследований. При этом не учитывается уплотнение концентрата в штабеле под действием собственной нагрузки за определенный период времени.

Кроме того, в настоящее время отсутствуют нормативно-методические указания по учету количества произведенного концентрата в зависимости от изменяющихся физико-механических параметров (в т. ч. плотности) отсыпаемого штабеля. В основном нормативы представлены строительными нормами по возведению насыпных объектов и ГОСТами по оценке физико-механических свойств и характеристик грунтов.

Выполненные исследования предназначены для разработки рекомендаций по учету в расчетах технологического и товарного баланса ОФ изменений плотности концентрата в зависимости от высоты штабеля.

## Описание работы

Режимы работы ОФ в составе железорудного ГОК характеризуются неравномерностью поступления исходного минерального сырья на обогащение и подачи полученного железорудного концентрата на следующие стадии производства готовой продукции (цеха агломерации и окомкования). При этом в отдельные периоды значительные объемы концентрата накапливаются и длительное время (до 21 суток) хранятся в штабелях складов ОФ. При длительном хранении концентрата на складах происходит его слеживание и сокращение в объемах, что приводит к несоответствию определения весовых коэффициентов концентрата при расчете технологического баланса ОФ.

Целью исследований являлось выявление закономерностей изменения плотности железорудных концентратов, отсыпаемых в штабель под действием веса вышележащих слоев.

Отсыпаемый в штабель концентрат представляет собой многослойную структуру, сформированную частицами определенной формы, между которыми при отсыпке образуются поры, заполненные твердой, жидкой или газообразной фазой. Для установления закономерностей изменения плотности железорудных концентратов, отсыпаемых в штабель, произведено моделирование степени наполнения складов под действием заданной нагрузки.

Лабораторными экспериментами установлено [1, 5–11], что под воздействием приложенных нагрузок твердые частицы дисперсного материала (концентрата) практически не уплотняются. Уплотнение концентрата происходит за счет сокращения (или полного удаления) из него газообразной или жидкой фазы. Удаление жидкой фазы связано с фильтрацией воды и может происходить только при длительном,

измеряемом месяцами, действии уплотняющей нагрузки (консолидации), что подтверждается лабораторными исследованиями по определению коэффициента фильтрации концентрата, значения которого не превышают 0,025 м/сут.

Для оценки динамики изменения коэффициента фильтрации от содержания в концентрате класса крупности — 0,071 мм на основе корреляционно-регрессионного анализа экспериментальных данных авторами построена зависимость  $K_{\phi} = f(A_{-0,071})$  (рис. 1).

Коэффициент фильтрации концентрата определялся расчетом на основе данных о гидравлических характеристиках [2] потока воды фильтруемого через пробу концентрата, установленных инструментальным методом (фильтрационным прибором типа КФ-00М) в соответствии с ГОСТ 25584–2016 п. 4.2 (табл. 1).

Значение коэффициента фильтрации концентрата, приведенного к условиям фильтрации при температуре +10 °С, определялось по следующему выражению, м/сут:

$$K_{10} = 864 \frac{K_{\phi}}{T}, \quad (1)$$

где  $T = (0,7 + 0,03T_{\phi})$  — поправка для приведения коэффициента фильтрации к условиям фильтрации воды при  $T = 10^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\phi}$  — фактическая температура воды при испытании, °С; 864 — переводной коэффициент из см/с в м/сут;  $K_{\phi}$  — рассчитываемый коэффициент фильтрации по результатам испытания, см/с.

Величина коэффициента фильтрации по данным испытаний, см/с:

$$K_{\phi} = \frac{Q_{\text{в}}}{t_{\phi} F l} = \frac{v}{l}, \quad (2)$$

где  $Q_{\text{в}}$  — объем воды, профильтровавшейся на соответствующем этапе испы-

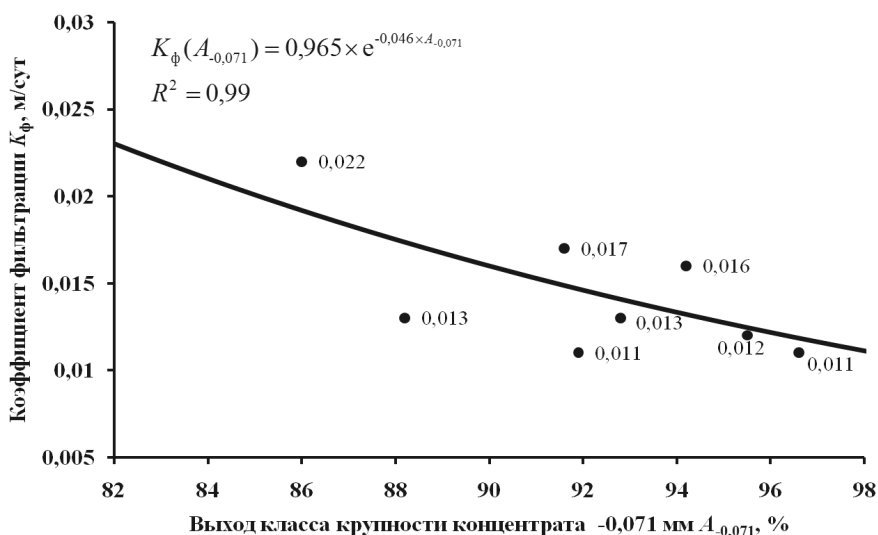


Рис. 1. Регрессионная зависимость величины коэффициента фильтрации от содержания в концентрате класса крупности – 0,071 мм

Fig. 1. Regressional relationship between seepage coefficient and content of 0.071 mm size in concentrate

Таблица 1

Результаты лабораторного определения коэффициента фильтрации железорудного концентрата

Laboratory testing data on iron ore concentrate permeability

Тип пробы	Номер пробы	Коэффициент фильтрации $K_{\phi}, \text{м/сут.}$	Содержание класса – 0,071 мм, %	Плотность сухого уплотненного концентрата, т/м <sup>3</sup>
Концентрат агломерационный (А)	А4	0,017	91,6	2,97
	А5	0,011	91,9	2,99
	А6	0,022	86,0	3,05
	А7	0,013	88,2	3,06
Среднее по пробам А		0,016	89,4	3,02
Концентрат для производства окатышей (О)	О6	0,011	96,6	3,00
	О7	0,013	92,8	2,96
	О8	0,016	94,2	3,00
	О9	0,012	95,5	3,05
Среднее по пробам О		0,013	94,8	3,00
Средняя по концентрату		0,014	92,1	3,01

таний, см<sup>3</sup>;  $t_{\phi}$  – время фильтрации на соответствующем этапе испытаний, с;  $F_{\text{ц}}$  – площадь поперечного сечения цилиндра с пробой концентрата заданной массы  $m_{\text{н}}$ , см<sup>2</sup>;  $l$  – задаваемый напорный градиент определяющий этапы испытания (0,2; 0,4; 0,6; 0,8 и 1,0), ед.

Масса навески концентрата для определения коэффициента фильтрации устанавливалась в соответствии с п. 4.2.3.3 ГОСТ 25584 – 2016 по следующему выражению, г:

$$m_{\text{н}} = V_{\text{ц}} \frac{1+W}{1+e} \rho_{\text{с}}$$

$$\text{или } m_n = V_{\text{ц}} \rho_3, \quad (3)$$

где  $V_{\text{ц}}$  — объем цилиндра фильтрационного прибора,  $\text{см}^3$ ;  $W$  — влажность концентрата, дол. ед.;  $\rho_s$  — плотность минеральной части концентрата,  $\text{г}/\text{см}^3$ ;  $e$  — пористость концентрата, дол. ед.;  $\rho_3$  — заданная плотность,  $\text{г}/\text{см}^3$ .

Если учесть, что зерна (частицы) концентрата занимают часть площади поперечного сечения потока фильтрации, тогда действительный коэффициент фильтрации, учитывающий фактическую площадь фильтрации воды ( $F_{\text{ф}} < F$ ), составит,  $\text{м}/\text{сут}$ :

$$K_{\text{ф.д}} = \frac{K_{10}}{n}, \quad (4)$$

где  $n$  — пористость концентрата, дол. ед.

Лабораторными исследованиями и моделированием коэффициента фильтрации с учетом содержания в концентрате класса крупности  $-0,071$  мм, выполненными авторами, установлена статистическая зависимость между коэффициентом фильтрации ( $K_{\text{ф}}$ ) и насыпной плотностью концентрата, которая определяется как обратная «весьма сильная», т. е. при росте коэффициента фильтрации насыпная плотность уменьшается (корреляционное отношение 0,98).

Кратковременное действие нагрузки (часы, сутки) приводит к уплотнению концентрата за счет удаления газообразной фазы, а жидкая фаза не отфильтровывается из концентрата. Пределом уплотнения концентрата от кратковременно действующей нагрузки является полное удаление газообразной фазы и превращение материала из трехфазной системы в двухфазную («твердая-жидкая»).

Остаточная пористость концентрата зависит от величины уплотняющего воздействия, чем больше уплотняющая нагрузка и ее продолжительность, тем

меньше остаточная пористость и выше плотность концентрата.

Процесс сжатия концентрата характеризуется компрессионной кривой, которая может быть представлена как графически, так и задана аналитически [1, 4, 7],  $e_i = e_0 - m_0 \ln \times (P_0/P_i)$  где  $e_i$  и  $P_i$  — коэффициент пористости и давление, соответствующие  $i$ -му времени сжатия концентрата;  $e_0$  и  $P_0$  — начальный коэффициент пористости и начальное (атмосферное) давление;  $m_0$  — коэффициент сжимаемости (компресси) концентрата.

### Результаты исследований

Изменение пористости концентрата в теле штабеля происходит за счет следующих факторов [1 — 12]:

- смещения частиц и их агрегатов в сторону заполнения пор;
- выдавливания воды и воздуха из пор.

Нагрузка, обусловленная действием собственного веса толщи вышележащих слоев концентрата в штабеле, создает уплотняющее давление ( $P$ ). Концентрат в виде 2-х фазной системы, состоящей из скелета (минеральных частиц) и поровой воды, создает «эффективное» давление ( $P_s$ ) и давление поровой воды ( $P_w$ ). Давление  $P_w$  создает напор и вызывает фильтрацию воды в концентрате, где при  $t = 0$ ;  $P = P_w$ , при  $t = t_1$ ;  $P = P_s + P_w$  и при  $t = \infty$ ;  $P = P_s$ . Создаваемое давление на определенной глубине штабеля, определяется как геостатическое (горное) давление, МПа:

$$P(h) = \left[ g \int_0^h \rho(h) dh \right] + P_w = g[(1 - e)\rho_s + e\rho_w]h + P_w, \quad (5)$$

где  $\rho_s$  — плотность минеральной (твердой) части концентрата,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\rho_w$  — плотность поровой жидкости,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$e$  — пористость концентрата, дол. ед;  
 $\rho_k$  — объемная плотность концентрата, кг/м<sup>3</sup>;  $h$  — глубина заложения рассматриваемой точки в теле штабеля (толщина вышележащего слоя штабеля), м;  $g$  — ускорение свободного падения (9,807), м/с<sup>2</sup>;  $P_w$  — нейтральное давление поровой воды, МПа.

Степень уплотнения концентрата под действием нагружающих сил (вес вышележащих слоев штабеля концентрата) определялась лабораторными испытаниями, методом компрессионного сжатия по ГОСТ 12248—2010 п. 5.4 [14]. Характеристики, определяющие уплотнение концентрата, устанавливались расчетным способом по результатам испытаний образцов концентрата в компрессионном приборе типа «АСИС» [1, 3, 4, 7].

Физические свойства подготовленных для компрессионных испытаний образцов концентрата определялись лабораторными и расчетными методами (гидростатическим взвешиванием, пикнометрическим методом, взвешиванием высушенного образца и др.) (табл. 2).

Нагрузка на образец концентрата задавалась с шагом кратным весу слоя штабеля толщиной 2 м и определялась расчетным путем на максимальную высоту штабеля — 10 м.

Характеристики уплотняемости концентрата (табл. 3) авторами определялись расчетным способом, по данным полученным с компрессионного прибора «АСИС» по следующим формулам [4, 5, 8]:

— относительная вертикальная деформация образца

$$\varepsilon_i = (e_0 - e_i)/(1 + e_0) = S/h_0 = \Delta h_i/h_0, \quad (6)$$

— коэффициент пористости концентрата

$$e_i = e_0 - \varepsilon_i(1 + e_0) = (h_i/h_0) \cdot (\rho_s/\rho_d) - 1, \quad (7)$$

— коэффициент сжимаемости концентрата

$$m_0 = e_i - e_{i+1}/(P_{i+1} - P_i) = \operatorname{tg} \alpha, \quad (8)$$

— коэффициент относительной сжимаемости концентрата

$$m_v = m_0/(1 + e_0), \quad (9)$$

— модуль деформации

$$E_k = (P_{i+1} - P_i/\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i)\beta = [1 + e_0/m_0]\beta, \quad (10)$$

где  $h_0$  — высота образца до начала испытаний, мм;  $h_i$  — измененная высота образца при его компрессионном сжатии, мм;  $S$  — осадка образца, мм;  $e_0$  — коэффициент пористости образца до начала испытаний, дол. ед.;  $e_i, e_{i+1}$  — коэффициенты пористости, соответствующие давлениям  $P_i$  и  $P_{i+1}$ , дол. ед.;  $\varepsilon_i, \varepsilon_{i+1}$  — относительное сжатие, соответствующие давлениям  $P_i$  и  $P_{i+1}$ ;  $\beta$  — коэффициент, учитывающий отсутствие поперечного расширения концентрата в компрессионном приборе ( $\beta = 1 - (2\nu^2/1 - \nu)$ ,  $\nu$  — коэффициент Пуассона).

По результатам компрессионных испытаний образцов концентрата авторами установлено следующее:

— уплотнение концентратов под действием нагрузки производится за счет уменьшения их пористости;

— процесс изменения пористости концентрата в теле штабеля происходит за счет смещения минеральных частиц и их агрегатов в сторону заполнения пор и выдавливания из них воды и воздуха;

— в зависимости от прилагаемой нагрузки определен коэффициент сжимаемости концентрата, изменяющийся в диапазоне 0,1—0,3, что по классификации соответствует средней сжимаемости дисперсных материалов;

— с увеличением нагрузки от 0,015 МПа (соответствует толщине слоя

Таблица 2

**Физические свойства исследуемых образцов железорудного концентрата**  
**Physical properties of the studied samples of iron ore concentrate**

№ образца	Физические характеристики концентрата для производства окатышей (О)							
	$W^*$ , д.е	$\rho$ , т/м <sup>3</sup>	$\rho_d$ , т/м <sup>3</sup>	$\rho_s$ , т/м <sup>3</sup>	$n$ , %	$e_0$ , д.е.	$S_r$ , д.е.	$B$
О6	0,10	2,90	2,64	4,81	45,11	0,822	0,59	0,80
О7	0,09	2,80	2,57	4,81	46,57	0,872	0,50	0,80
О8	0,10	2,80	2,55	4,79	46,76	0,878	0,56	0,80
О9	0,10	2,83	2,57	4,83	46,79	0,879	0,56	0,80

\*  $W$  – влажность,  $\rho$  – плотность концентрата в естественном состоянии,  $\rho_d$  – плотность сухого концентрата,  $\rho_s$  – плотность минеральной (твердой) части,  $n$  – пористость;  $e_0$  – коэффициент пористости,  $S_r$  – коэффициент водонасыщения

Таблица 3

**Результаты компрессионных испытаний образцов концентрата и расчетные значения характеристик их уплотняемости**  
**Results of compression tests of concentrate samples and calculated values of their compaction characteristics**

№ образца	Время от начала, ч	Нагрузка $P_i$ , МПа	Деформация, мм	Относительная деформация $\varepsilon_i$	Модуль деформации $E_{кi}$ , МПа	Коэффициент пористости $e_i$ , дол. ед.	Коэффициент сжимаемости $m_0$ , МПа <sup>-1</sup>
О6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,822	0,0
	12,1	0,014	0,06	0,003	4,494	0,817	0,324
	24,7	0,055	0,25	0,010	4,459	0,804	0,327
	37,4	0,149	0,50	0,020	7,309	0,785	0,199
	50,3	0,250	0,72	0,029	9,230	0,769	0,158
О7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,872	0,0
	12,9	0,015	0,06	0,002	6,197	0,868	0,242
	25,3	0,056	0,18	0,007	6,445	0,858	0,232
	37,5	0,149	0,41	0,016	8,263	0,842	0,181
	50,2	0,249	0,56	0,022	13,400	0,830	0,112
О8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,878	0,0
	12,9	0,015	0,09	0,004	3,099	0,871	0,485
	25,3	0,055	0,27	0,011	4,587	0,858	0,328
	37,8	0,150	0,49	0,020	8,342	0,841	0,180
	50,3	0,249	0,66	0,026	13,232	0,830	0,114
О9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,879	0,0
	12,9	0,015	0,08	0,003	4,132	0,874	0,364
	25,4	0,056	0,27	0,011	4,085	0,859	0,368
	37,6	0,149	0,62	0,025	5,283	0,832	0,285
	50,3	0,249	0,92	0,037	6,819	0,810	0,220
Среднее по пробам	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,862	0,0
	12,7	0,0148	0,07	0,003	4,481	0,858	0,354
	25,2	0,0555	0,24	0,0098	4,894	0,845	0,314
	37,6	0,1493	0,51	0,0203	7,299	0,825	0,211
	50,3	0,2493	0,72	0,0285	10,670	0,810	0,151

Таблица 4

Изменение плотности образцов концентрата в зависимости от прилагаемой нагрузки  
*Change of stockpile layer slump versus stockpile height*

№ образца	Устанавливаемая нагрузка $P_i$ , МПа	Масса пробы, г	Объем образца пробы после испытания, см <sup>3</sup>	Плотность образца пробы после испытания, т/м <sup>3</sup>
06	0,015	430,83	148,19	2,91
	0,055	430,83	147,06	2,93
	0,150	430,83	145,57	2,96
	0,250	430,83	144,26	2,99
07	0,015	415,26	148,07	2,80
	0,055	415,26	146,88	2,83
	0,150	415,26	144,86	2,84
	0,250	415,06	143,08	2,86
08	0,015	415,81	148,01	2,81
	0,055	415,81	146,94	2,83
	0,150	415,81	145,63	2,86
	0,250	415,71	144,62	2,87
09	0,015	420,12	148,07	2,84
	0,055	420,12	146,94	2,86
	0,150	420,12	144,86	2,90
	0,250	419,72	143,08	2,93

в 0,5 м) до 0,25 МПа (соответствует толщине слоя в 10 м) плотность концентратов в штабеле увеличивается с 2,84 т/м<sup>3</sup> до 2,91 т/м<sup>3</sup> (~ на 4,5 %) (табл. 4).

Для определения (в масштабе реального насыпного тела) степени осадки штабеля в зависимости от его высоты выполнены расчеты по установлению эквивалентной нагрузки от вышележащего слоя концентрата на нижележащий слой. Под эквивалентной нагрузкой понимается слой концентрат с высотой, создающий нагрузку, равную 0,015, 0,055, 0,15 и 0,25 МПа (рис. 2, табл. 5).

Величина конечной (после уплотнения) высоты слоя штабеля (высоты, при которой прекращается его осадка) определяется следующей разностью:

$$h_{ci}^i = h_{ci} - S_i = h_i - \frac{h_{ci}(1 + e_i)}{1 + e_0}, \quad (11)$$

где  $h_{ci}$  — высота  $i$ -го слоя штабеля до начала воздействия на него нагрузки, м;  $S_{ci}$  — осадка  $i$ -го слоя штабеля, м.

Величина осадки штабеля от действия нагрузки (табл. 6) рассчитывается по следующей формуле [13, 16, 19–21], м:

$$\begin{aligned} S_c &= h_c \frac{e_0 - e_i}{1 + e_0} = h_c \frac{m_0 P_i}{1 + e_0} = \\ &= h_c \frac{\beta}{E_k} P_i, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $h_c$  — высота слоя концентрата, принимающего нагрузку от вышележащих слоев штабеля, м;  $e_0$  — средний начальный коэффициент пористости концентрата, соответствующий условиям его естественного залегания, дол. ед.;  $e_i$  — средний коэффициент пористости концентрата после действия  $P_i$  нагрузки (см. табл. 3), дол. ед.  $E_k$  — модуль деформации;  $P_i$  — действующая на слой концентрата нагрузка  $P_i$ , МПа.



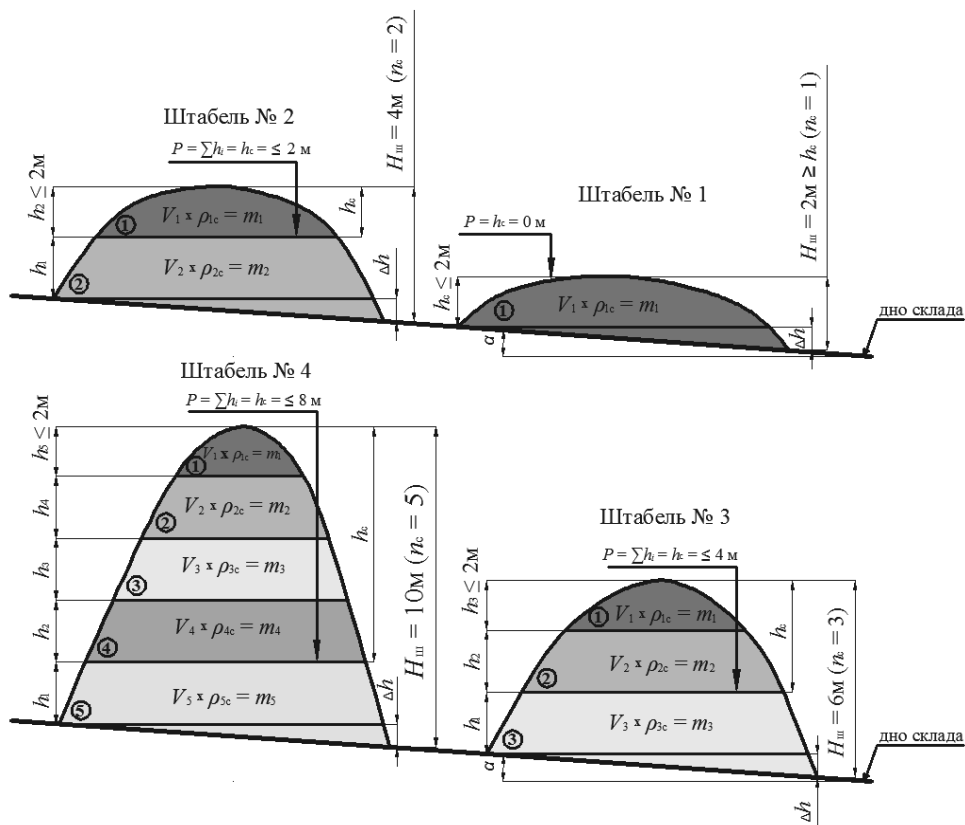


Рис. 2. Варианты отсыпки штабеля концентрата на складе:  $h_{1,2,\dots,i}$  – высота слоя штабеля равная;  $h_c = \sum_{i=1}^n h_i$  – высота вышележащего слоя, создающего нагрузку  $P$

Fig. 2. Concentrate stockpiling scenarios at warehouse:  $h_{1,2,\dots,i}$  – stockpile layer height;  $h_c = \sum_{i=1}^n h_i$  – height of overlying layer generating load  $P$

Таблица 5

Определение высоты слоя штабеля концентрата, эквивалентной действующей нагрузке  
 Determination of concentrate stockpile layer height equivalent to effective load

Устанавливаемая нагрузка, $P_i$		Средняя плотность концентрата в эквивалентном слое штабеля $\rho_c$ (установлена экспериментально)*, $\text{т/м}^3$	Расчетная высота эквивалентного слоя, соответствующая прилагаемой нагрузке $P_i$ , $h_c = P_i / \rho_c$ , м	
МПа	кгс/м <sup>2</sup>			т/м <sup>2</sup>
0	0	0	2,83	0
0,015	1529,6	1,5	2,84	0,5
0,055	5608,4	5,6	2,86	2,0
0,15	15295,7	15,3	2,89	5,4
0,25	25492,9	25,5	2,91	8,9

\* средняя плотность концентрата для соответствующего слоя штабеля принимается постоянной (плотность рассчитана по данным табл. 4).

Таблица 6

Рассчитанные значения величины осадки штабеля от действия нагрузки  
 Calculated values of stockpile slump under loading

Действующая нагрузка $P_i$ , МПа	Высота оцениваемого слоя $h_c$ , м	Коэффициент пористости $e_i$ , дол. ед.	Плотность образца, $\tau/\text{м}^3$	Осадка слоя штабеля $S_c$ , м	Изменение высоты слоя от осадки штабеля $\Delta h_c = 100(S_c / h_c)$ , %
0,0	0	0,862	2,83	0,0	0,0
0,015	0,5	0,858	2,84	0,001	0,21
0,055	2,0	0,845	2,86	0,02	0,91
0,150	5,0	0,825	2,89	0,10	1,99
0,250	10,0	0,810	2,91	0,28	2,79

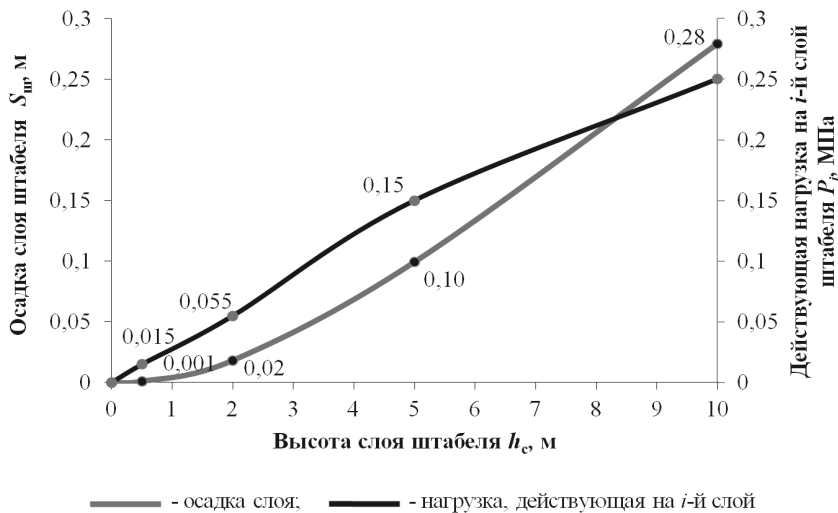


Рис. 2. График изменения осадки слоя штабеля от его высоты

Fig. 2. Graph of the change in the draft of the stack layer from its height

Расчеты выполнены с использованием результатов компрессионных испытаний образцов концентрата (табл. 3) и результатов определения изменения плотности концентрата в зависимости от прилагаемой нагрузки (табл. 4). Высоты оцениваемого слоя концентрата приняты в соответствии с табл. 5.

С увеличением нагрузки от 0,015 МПа до 0,25 МПа расчетное изменение высоты слоя штабеля за счет его осадки составляет от 0,001 до 0,28 м.

По результатам расчетов авторами построены графики по оценке изменения осадки слоев штабеля концентрата (рис. 2, 3).

На основе полученных результатов компрессионных исследований концентрата (табл. 3 и 4) построена обобщающая регрессионно-корреляционная зависимость, устанавливающая зависимость изменения плотности концентрата в теле штабеля от высоты слоя создающего нагрузку (рис. 4).

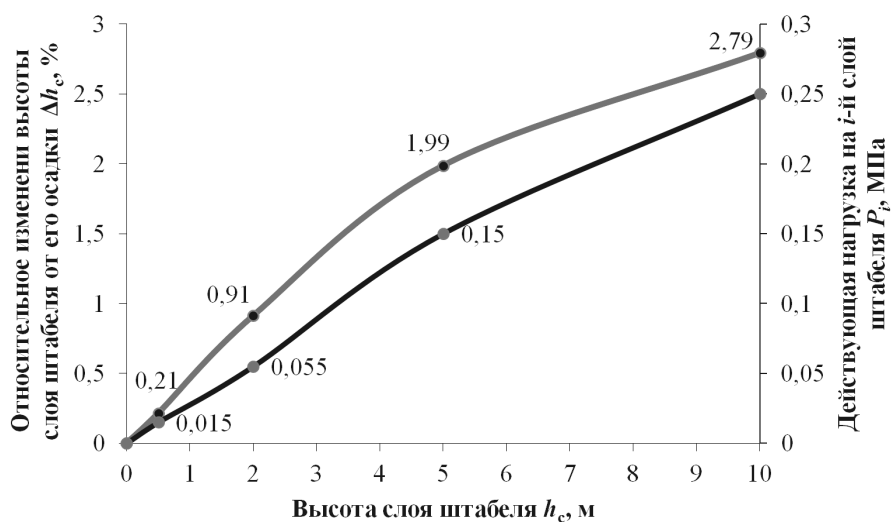


Рис. 3. График относительного изменения высоты слоя штабеля от его осадки  
 Fig. 3. Relative change in stockpile layer height versus slump

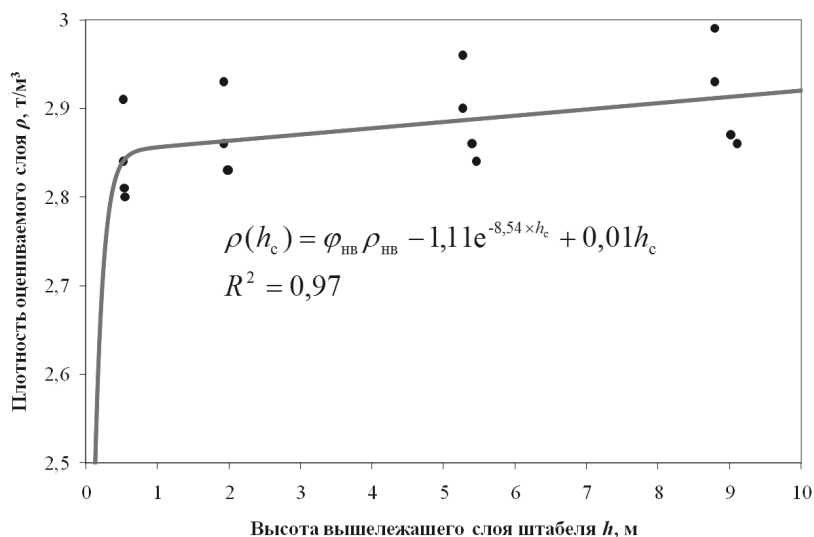


Рис. 4. График регрессионно-корреляционной зависимости оценки плотности концентрата от изменения высоты вышележащего слоя штабеля:  $\varphi_{нв}$  — коэффициент, учитывающий мгновенное удаление свободного порового пространства от действия нагрузки вышележащего слоя концентрата ( $\varphi_{нв} = 1,9 \div 1,4$  составляет для  $\rho_{нв}$  от 1,5 до 2,0 т/м<sup>3</sup>);  $\rho_{нв}$  — насыпная плотность концентрата, т/м<sup>3</sup>;  $h_c$  — высота вышележащего давящего слоя концентрата (определяется как кратная двум метрам  $h_c = 2, 4, 6, 8, 10, \dots, n_c, n_c + 2$ ), м  
 Fig. 4. Regressional correlation of estimate concentrate density and overlying stockpile layer height:

$\varphi_{нв}$  — coefficient of instantaneous vanish of free pore space under the effect of load generated by overlying layer of concentrate ( $\varphi_{нв} = 1.9-1.4$  for  $\rho_{нв}$  from 1.5 to 2.0 t/m<sup>3</sup>);  $\rho_{нв}$  — bulk density of concentrate, t/m<sup>3</sup>;  $h_l$  — height of overlying loading layer of concentrate (divisible by 2 m:  $h_l = 2, 4, 6, 8, 10, \dots, n_l, n_l + 2$ ), m

Зависимость (рис. 4) получена с использованием разработанной ИГД УРО РАН компьютерной программы «Тренды ФСП-1», предназначенной для расчета (по случайно распределенным значениям зависимой величины) и графического построения уравнений нелинейной регрессии, трендов, обладающих повышенной достоверностью, представленных в виде полиномов функций, параметры которых (показатели, коэффициенты, основания и т. д.) самоопределяются в процессе расчета.

Для конкретных образцов концентрата титаномагнетитовой руды, отобранных на складе ОФ, установлен характер изменения его плотности по высоте штабеля, построена регрессионная зависимость оценки плотности концентрата от изменения высоты вышележащего слоя штабеля, которая позволит маркшейдерской службе предприятия прогнозировать изменение объема штабеля в зависимости от его высоты.

### Выводы

В статье приведены результаты лабораторных экспериментальных исследований по моделированию процесса уплотнения титаномагнетитового концентрата под действием нагрузки. Установлены закономерности изменения плотности железорудного концентрата в штабеле за счет сокращения (или полного удаления) из него газобразной или жидкой фазы и измене-

ний осадки штабеля концентрата от его высоты.

Установлено следующее:

- в зависимости от прилагаемой нагрузки определен коэффициент сжимаемости концентрата, изменяющийся в диапазоне 0,1 – 0,3, что по классификации соответствует средней сжимаемости дисперсных материалов;

- с увеличением нагрузки от 0,015 МПа (соответствует толщине слоя в 0,5 м) до 0,25 МПа (соответствует толщине слоя в 10 м) плотность концентратов в штабеле увеличивается с 2,84 т/м<sup>3</sup> до 2,91 т/м<sup>3</sup> (~ на 4,5 %);

- с увеличением нагрузки от 0,015 МПа до 0,25 МПа расчетное изменение высоты слоя штабеля за счет его осадки составляет от 0,001 до 0,28 м;

- установлена корреляционно-регрессионная зависимость изменения плотности слоя концентрата в штабеле от действия нагрузки от вышележащих слоев:


$$\rho(h_c) = \phi_{\text{нв}} \rho_{\text{нв}} - 1,11e^{-8,54h_c} + 0,01h_c,$$

погрешность оценки задается алгоритмом вычисления в программе «Тренды ФСП-1» в пределах 0,02 т/м<sup>3</sup>.

Полученные зависимости позволяют оценить изменение насыпной плотности концентратов в зависимости от степени наполнения складов, что имеет большое значение для учета объема отгрузки концентрата для изготовления готовой продукции (агломерата и окатышей) и при составлении технологического и товарного балансов обогатительной фабрики.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРА

1. *Ольховатенко В. Е., Рязанов Н. С.* Основы инженерной геологии и механики грунтов: [в 2 ч.]. — Томск: Изд-во Томского гос. архитектур.-строит. ун-та, 2005. — 311 с.
2. *Лойцянский Л. Г.* Механика жидкостей и газа. — М.: Дрофа, 2003. — 840 с.
3. *Барац Н. И., Туякова А. К., Ширватова Е. А.* Определение деформационных и прочностных характеристик грунтов: методические указания к лабораторным работам. — Омск: Изд-во СибАДИ, 2008. — 36 с.
4. *Болдырев Г. Г., Сидорчук В. Ф.* Определение механических свойств грунтов в компрессионном приборе с измерением боковых напряжений // Автоматизированные технологии изысканий и проектирование. — 2003. — № 9–10. — С. 69–71.

5. Булгаков А. Г., Дыба В. П., Скибин Г. М. Механика грунтов в решении геотехнических задач. — Новочеркасск: Наука. Образование. Культура, 2011. — 326 с.
6. Гриб С. И. Физические и механические характеристики грунтов. Методы определения: лабораторный практикум. — Красноярск: Издательство Крас-ГАСА, 2004. — 87 с.
7. Иванов П. Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений. — М.: Высшая школа, 1985. — 352с.
8. Малышев М. В. Механика грунтов. Основания и фундаменты (в вопросах и ответах). — М.: Издательство Ассоциация строительных вузов (АСВ), 2015. — 104 с.
9. Зерцалов М. Г. Механика скальных грунтов и скальных массивов. — М.: Юриспруденция, 2003. — 184 с.
10. Беляков Н. А., Карасев М. А., Трушко В. Л. Механика сплошной среды. — СПб.: Санкт-Петербургский горный университет, 2019. — 114 с.
11. Дашко Р. Э. Инженерно-геологический анализ и оценка водонасыщенных глинистых пород как основания сооружений. — СПб.: Институт «ПИ Геореконструкция», 2015. — 374 с.
12. Шапиро Д. М. Нелинейная механика грунтов. — Воронеж: Воронежский ГАСУ, 2016. — 123 с.
13. ГОСТ 12248—2010 Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. — введен 2012.01.01. — М.: Изд-во ФГБУ Стандартиформ, 2011. —83 с.
14. Козин В. З. Опробование на обогатительных фабриках. — М.: Недра, 1988. — 287 с.
15. Козин В. З. Опробование минерального сырья. — Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2011. — 316 с.
16. Мащенко А. В., Пономарев А. Б., Сычкина Е. Н. Специальные разделы механики грунтов и механики скальных грунтов. — Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. — 176 с.
17. Kanji M. He M., L. R. e Sousa Soft Rock Mechanics and Engineering. — Springer Nature Switzerland AG, 2020. — 749 p. DOI: 10.1007/978—3-030—29477—9.
18. Xia-Ting Feng Rock Mechanics and Engineering Vol. 1: Principles. — London: CRC Press, 2017. — 784 p. DOI: 10.1201/9781315364261.
19. Xia-Ting Feng Rock Mechanics and Engineering Vol. 2: Laboratory and Field Testing. — London: CRC Press, 2016. — 646 p. DOI: 10.1201/9781315364254.
20. Xia-Ting Feng Rock mechanics and engineering Volume 3: Analysis, modeling & design. — London: CRC Press, 2017. — 928 p. DOI: 10.1201/b20402.
21. Debashish D., Abhiram K. V. Fundamentals and Applications of Rock Mechanics. — NewDelhi: PHI Learning, 2016. — 412 p. 

#### Reference

1. Ol'hovatenko V. E., Ryazanov N. S. *Osnovy inzhenernoj geologii i mekhaniki gruntov* [Fundamentals of engineering geology and soil mechanics]: [v 2 ch.]. Tomsk : Izd-vo Tomskogo gos. arhitektur.- stroit. un-ta, 2005. 311 p. [In Russ]
2. Lojcyanskij L. G. *Mekhanika zhidkостей i gaza* [Mechanics of liquids and gases]. Moscow: Drofa, 2003. 840 p. [In Russ]
3. Barac N. I., Tuyakova A. K., Shirovatova E. A. *Opredelenie deformatsionnyh i prochnostnyh harakteristik gruntov: metodicheskie ukazaniya k laboratornym rabotam* [Determination of deformation and strength characteristics of soils: methodological guidelines for laboratory work]. Omsk: Izd-vo SibADI, 2008. 36 p. [In Russ]
4. Boldyrev G. G., Sidorchuk V. F. Determination of mechanical properties of soils in a compression device with measurement of lateral stresses. *Avtomatizirovannye tekhnologii izyskanij i proektirovanie*. 2003. no. 9—10. pp. 69—71. [In Russ]
5. Bulgakov A. G., Dyba V. P., Skibin G. M. *Mekhanika gruntov v reshenii geotekhnicheskikh zadach* [Soil mechanics in solving geotechnical problems]. Novocherkassk: Nauka. Obrazovanie. Kul'tura, 2011. 326 p. [In Russ]

6. Grib S. I. *Fizicheskie i mekhanicheskie harakteristiki gruntov. Metody opredeleniya: laboratornyj praktikum* [Physical and mechanical characteristics of soils. Methods of determination: laboratory practice]. Krasnoyarsk: Izdatel'stvo Kras-GASA, 2004. 87 p. [In Russ]
7. Ivanov P. L. *Grunty i osnovaniya gidrotekhnicheskikh sooruzhenij* [Soils and foundations of hydraulic structures]. Moscow: Vysshaya shkola, 1985. 352 p. [In Russ]
8. Malyshev M. V. *Mekhanika gruntov. Osnovaniya i fundamenty (v voprosah i otvetah)* [Mechanics of soils. Foundations and foundations (in questions and answers)]. Moscow: Izdatel'stvo Associaciya stroitel'nyh vuzov (ASV), 2015. 104 p. [In Russ]
9. Zercalov M. G. *Mekhanika skal'nyh gruntov i skal'nyh massivov* [Mechanics of rock soils and rock massifs]. Moscow: Yurisprudenciya, 2003. 184 p. [In Russ]
10. Belyakov N. A., Karasev M. A., Trushko V. L. *Mekhanika sploshnoj sredy* [Mechanics of a continuous medium]. Saint-Petersburg: Sankt-Peterburgskij gornij universitet, 2019. 114 p. [In Russ]
11. Dashko R. E. *Inzhenerno-geologicheskij analiz i ocenka vodonasyshchennyh glinistyh porod kak osnovaniya sooruzhenij* [Engineering-geological analysis and evaluation of water-saturated clay rocks as the basis of structures]. Saint-Petersburg: Institut «PI Georekonstrukciya», 2015. 374 p. [In Russ]
12. Shapiro D. M. *Nelinejnaya mekhanika gruntov* [Nonlinear mechanics of soils]. Voronezh: Voronezhskij GASU, 2016. 123 p. [In Russ]
13. GOST 12248 – 2010 *Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya harakteristik prochnosti i deformiruемости. vveden 2012.01.01.* Moscow: Izd-vo FGBU Standartinform, 2011. 83 s. [In Russ]
14. Kozin V. Z. *Oprobovanie na obogatitel'nyh fabrikah* [Testing at processing plants]. Moscow: Nedra, 1988. 287 p. [In Russ]
15. Kozin V. Z. *Oprobovanie mineral'nogo syr'ya* [Testing of mineral raw materials]. Ekaterinburg: Izd-vo UGGU, 2011. 316 p. [In Russ]
16. Mashchenko A. V., Ponomarev A. B., Sychkina E. N. *Special'nye razdely mekhaniki gruntov i mekhaniki skal'nyh gruntov* [Special sections of soil mechanics and mechanics of rock soils]. Perm': Izd-vo Perm. nac. issled. politekhn. un-ta, 2014. 176 p. [In Russ]
17. Kanji M. He M., L. R. e Sousa *Soft Rock Mechanics and Engineering*. Springer Nature Switzerland AG, 2020. 749 p. DOI: 10.1007/978-3-030-29477-9.
18. Xia-Ting Feng *Rock Mechanics and Engineering Vol. 1: Principles*. London: CRC Press, 2017. 784 p. DOI: 10.1201/9781315364261.
19. Xia-Ting Feng *Rock Mechanics and Engineering Vol. 2: Laboratory and Field Testing*. London: CRC Press, 2016. 646 p. DOI: 10.1201/9781315364254.
20. Xia-Ting Feng *Rock mechanics and engineering Volume 3: Analysis, modeling & design*. London: CRC Press, 2017. 928 p. DOI: 10.1201/b20402.
21. Debashish D., Abhiram K. V. *Fundamentals and Applications of Rock Mechanics*. NewDelhi: PHI Learning, 2016. 412 p.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Кантемиров Валерий Данилович*<sup>1</sup> – канд. техн. наук, заведующий сектором Управления качеством минерального сырья, ukrkant@mail.ru;

*Титов Роман Сергеевич*<sup>1</sup> – старший научный сотрудник, сектор Управления качеством минерального сырья, ukr07@mail.ru;

<sup>1</sup> Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Kantemirov V. D.*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Quality management sector chief, ukrkant@mail.ru;

*Titov R. S.*<sup>1</sup>, senior researcher, Quality management sector, ukr07@mail.ru;

<sup>1</sup> Institute of Mining of Ural branch of RAS, Ekaterinburg, Russia.

Получена редакцией 15.12.2020; получена после рецензии 15.03.2021; принята к печати 10.04.2021.

Received by the editors 15.12.2020; received after the review 15.03.2021; accepted for printing 10.04.2021.