

## СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАБОЧЕГО ИНДЕКСА ШАРОВОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ БОНДА

Л.С. Читалов<sup>1</sup>, В.В. Львов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: leo-need@bk.ru

**Аннотация:** Выполнен обзор, апробация и классификация существующих методов определения рабочего индекса шарового измельчения Бонда. Были рассмотрены методы следующих авторов: Б. Аксани и Б. Сомнез, Д. Тодоровик, Т.Ф. Берри и Р.В. Брюс, В.Е. Хорст и Дж.Х. Бассарер, Р. Ахмади, П.К. Капур, Х.Х. Гарешли, К.А. Льюис, Н.А. Магдалинович, В.К. Карра, Р. Смит и К. Ли, Д. Армстронг, а также компаний JKTech и Aminpro. В работе представлены заявленные авторами отклонения результатов их методов от актуального рабочего индекса шарового измельчения Бонда, а также ориентировочные трудозатраты на процедуру тестирования и необходимое для этого оборудование. Для методов Капура и Ахмади были предложены изменения, позволяющие повысить точность их результатов. Даны рекомендации к выбору числа оборотов мельницы в первом цикле измельчения в тесте Бонда для апатит-нефелиновых, медно-никелевых и железных руд для ячейки контрольного сита 106 мкм. Разработана оригинальная блок-схема по выбору альтернативного метода определения рабочего индекса шарового измельчения Бонда для различных исходных условий.

**Ключевые слова:** рабочий индекс шарового измельчения Бонда, измельчаемость, шаровое измельчение, тестирование руд, энергозатраты на измельчение, физико-механические свойства руд, лабораторные исследования, рудоподготовка, методы определения рабочего индекса шарового измельчения Бонда, трудозатраты.

**Благодарность:** Работа выполнена в рамках гранта Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) № 20-55-12002\20.

**Для цитирования:** Читалов Л. С., Львов В. В. Сравнительная оценка методов определения рабочего индекса шарового измельчения бонда // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 1. – С. 130–145. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-1-0-130-145.

### Comparative assessment of the Bond Ball Mill Work Index tests

L.S. Chitalov<sup>1</sup>, V.V. Lvov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: leo-need@bk.ru

**Abstract:** The article presents the review, studies and classification of the existing methods of the Bond Ball Mill Work Index determination. The scope of the analysis embraces the methods of Aksani and Sönmez, Todorović, Berry and Bruce, Horst and Bassarear, Ahmadi, Kapur, Gharegheshlagh, Lewis, Magdalovich, Karra, Smith and Lee, Armstrong, as well JKTech and Aminpro approaches. The deviations of the data of these methods from the actual values of the Bond Ball Mill Work Index are reported together with the approximate man-hours and

equipment involved in the testing procedures. Modifications are proposed for the methods of Kapur and Ahmadi toward the higher accuracy of the results. The recommendations are given for selecting the Bond mill revolutions in the first milling cycle for apatite–nepheline, copper–nickel and iron ore for the sieve size 106  $\mu\text{m}$ . An original procedure chart is proposed for choosing the determination method of the Bond Ball Mill Work Index for various initial conditions.

**Key words:** Bond Ball Mill Work Index, grindability, ball milling, ore testing, energy input in milling, physical and mechanical properties of ore, laboratory-scale studies, ore pretreatment, Bond Ball Mill Work Index determination procedures, man-hours.

**Acknowledgements:** The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research, Grant No. 20-55-12002\20.

**For citation:** Chitalov L. S., Lvov V. V. Comparative assessment of the bond ball mill work index tests. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(1):130-145. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-1-0-130-145.

---

## Введение

Ключевым этапом совершенствования технологии переработки большинства руд за последние годы явилось повышение эффективности операций измельчения [1–3]. При проектировании обогатительных фабрик выбор технологической схемы подготовки руды к обогащению, типа, количества и размеров основного технологического оборудования, определение оптимальных режимов измельчения и расчет нагрузок на оборудование осуществляются путем предварительных исследований измельчаемости в полупромышленных или лабораторных условиях. Полупромышленные испытания на установках непрерывного действия обеспечивают получение наиболее достоверной информации для расчета удельных нагрузок оборудования. Однако они связаны со значительными объемами проб руды, высокими трудозатратами и необходимостью использования пилотных установок.

Фред Бонд в 1961 г. опубликовал методологию определения рабочего индекса шарового измельчения [4]. Этот показатель до сих пор остается одним из наиболее востребованных инструментов при проектировании, оценке и оптимизации цехов шарового измельчения по всему миру [5]. Методология

определения рабочего индекса шарового измельчения Бонда требует около 10 кг материала и наличия стандартизированной шаровой мельницы [6]. Процесс тестирования занимает, в зависимости от таких условий, как крупность контрольного сита, гомогенность материала, гранулометрический состав и прочих, до 12 ч.

Чтобы снизить трудозатраты на определение рабочего индекса шарового измельчения Бонда, уменьшить требуемую массу пробы, иметь возможность определения индекса при отсутствии стандартизированного оборудования, множество исследователей пытались найти альтернативные методы определения этого показателя.

## Методы и результаты

Выбор методов для оценки измельчаемости руд зависит от типа проектируемой схемы и подхода к проектированию [7–12]. В отечественной практике, особенно в прошлом веке, использовался метод определения удельной производительности института Механобр. В мировой практике наибольшее применение получил метод Ф. Бонда.

Несмотря на широкое использование рабочего индекса шарового измельчения Бонда [13, 14], его недостаток за-

ключается в том, что для его определения требуется до 12 ч трудозатрат и до 10 кг исходной пробы [15]. В связи с этим использование тестовых процедур по определению рабочего индекса шарового измельчения Бонда (далее — индекса  $BW_i$ ) сложно использовать в проектах, где могут понадобиться сотни или тысячи тестов, например, для использования методов пространственного моделирования месторождения по прочностным свойствам или же осуществления текущего анализа руды, поступающей на обогатительную фабрику. В связи с этим многие исследователи пытались интенсифицировать процедуру определения индекса  $BW_i$ . Рассмотрим наиболее эффективные из существующих методов.

*Стандартная методология  
Ф. Бонда [6]*

Процедура определения рабочего индекса шарового измельчения представляет собой периодическое сухое измельчение в стандартизированной шаровой мельнице при фиксированной скорости вращения барабана (70 об/мин), стандартизированной шаровой загрузке (20,125 кг) и крупности питания (–3,35+ +0 мм).

Рассчитывается индекс  $BW_i$  из следующего выражения:

$$BW_i = \frac{1,1023 \cdot 44,5}{A^{0,23} G_{bp}^{0,82} 10 \left( \frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right)} \text{ кВтч/т} \quad (1)$$

где  $A$  — размер ячейки контрольного сита, мкм (как правило, 106 мкм);  $G_{bp}$  — параметр измельчаемости в последних трех циклах теста, г/об;  $F_{80}$  — теоретический размера ячейки сита, через которое проходит 80% массы исходной пробы, мкм;  $P_{80}$  — теоретический размера ячейки сита, через которое проходит 80% массы конечного продукта, мкм. Все

вышеописанные показатели находятся с помощью приведенной ниже процедуры тестирования.

В первом цикле исходная проба измельчается в течение 100 оборотов мельницы. Питание второго и последующих циклов состоит из надрешетного класса продукта предыдущего цикла, дополненного свежим питанием до первоначальной массы пробы.

Число оборотов мельницы в каждом следующем цикле рассчитывается из параметра измельчаемости в предыдущем цикле таким образом, чтобы циркулирующая нагрузка в узле мельница — классификатор достигала 250%. Для этого масса подрешетного продукта после измельчения должна составлять 1/3,5 от массы исходного питания. Циклы измельчения можно завершать, когда параметр измельчаемости ( $G_{bp}$ , г/об) и масса готового класса в течение трех циклов будут неизменными ( $\pm 2\%$ ). Продукты этих трех циклов объединяются и рассеиваются для нахождения параметра  $P_{80}$ .

Воспроизводимость результатов стандартной методологии Ф. Бонда лежит в пределах 3 — 5%.

*Тодоровик и др.*

Суть этой работы [17] заключается в использовании обнаруженных закономерностей между показателями различных циклов в рамках теста Бонда. Тодоровик обработал базу данных тестов Бонда и вывел следующие усредненные отношения для параметров измельчаемости в тесте Бонда:

$$\begin{aligned} \frac{G_e}{G_2} &\approx const \approx 1,158 ; \quad \frac{G_e}{G_3} \approx const \approx 1,096 ; \\ \frac{G_e}{G_4} &\approx const \approx 1,037 , \end{aligned} \quad (2)$$

где — стабилизированная измельчаемость для последних трех циклов теста Бонда, г/об;  $G_2, G_3, G_4$  — измельчаемо-

сти для 2, 3 и 4 циклов теста Бонда соответственно.

Первый цикл не использовался, т.к. масса подрешетного продукта зависит от гранулометрического состава исходного питания и других характеристик материала.

Такие же отношения были найдены для параметров крупности продуктов:

$$\frac{P_{80}^e}{P_{80}^2} \approx const \approx 1,035; \quad \frac{P_{80}^e}{P_{80}^3} \approx const \approx 1,030;$$

$$\frac{P_{80}^e}{P_{80}^4} \approx const \approx 1,017, \quad (3)$$

где  $P_{80}^e$  — крупность продукта для последних трех циклов теста Бонда;  $P_{80}^2, P_{80}^3, P_{80}^4$  — крупности для продуктов 2, 3 и 4 циклов теста Бонда соответственно.

Таким образом, используя данные соотношения, можно выполнить два или более цикла измельчения в соответствии со стандартной процедурой Бонда, после чего рассчитать измельчаемость, произвести гранулометрический анализ продукта 2 цикла и рассчитать теоретически конечную измельчаемость и крупность продукта. Полученные показатели с параметром крупности питания и размером ячейки контрольного сита в дальнейшем используют для вычисления индекса  $BW_i$  по стандартной формуле (1).

Заявленная относительная ошибка для данного метода лежит в пределах 4%. Данный метод был опробован на пробе окисленных железистых кварцитов и показал относительную ошибку 4,4% и 0,3% при использовании показателей второго и третьего цикла измельчения соответственно.

#### *Берри и Брюс*

Метод Берри и Брюса [18] позволяет использовать любую шаровую мельницу для определения индекса  $BW_i$ .

Суть метода заключается в получении рабочего индекса шарового измель-

чения Бонда из результатов измельчения исследуемой и эталонной руды (для которой известен рабочий индекс шарового измельчения Бонда). Алгоритм действий следующий:

1. Проба известной массы исследуемой руды измельчается до достижения необходимой крупности продукта. Берри и Брюс использовали 2 кг руды крупностью –1,7 мм и мокрый режим измельчения.

2. Эталонная руда (с известным рабочим индексом) такой же массы как в п. 1 измельчается в той же мельнице, при тех же условиях.

3. Проводится ситовой анализ питания и продуктов измельчения для каждой пробы и рассчитываются параметры крупности  $F_{80}$  и  $P_{80}$ . Поскольку условия работы мельниц в обоих опытах одинаковы, то энергия, прикладываемая к пробам при измельчении, в обоих случаях должна также быть одинаковой. Исходя из этого индекс шарового измельчения Бонда исследуемой руды может быть рассчитан из равенства:

$$BW_i = \left( \frac{1}{\sqrt{P_u}} - \frac{1}{\sqrt{F_u}} \right) \cong W_{iref} \left( \frac{1}{\sqrt{P_{ref}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{ref}}} \right),$$

где  $W_{iref}$  — рабочий индекс Бонда эталонной руды;  $F_u$  и  $P_u$  —  $F_{80}$  и  $P_{80}$  исследуемой руды;  $F_{ref}$  и  $P_{ref}$  —  $F_{80}$  и  $P_{80}$  эталонной руды.

Заявленная относительная ошибка лежит в пределах 8%. Данный метод был опробован на пробе апатит-нефелиновой руды и показал относительную ошибку 6,3%.

#### *Хорст и Бассарер*

Данный метод [19] аналогичен методу Берри-Брюса в плане получения индекса Бонда на любых имеющихся шаровых мельницах. Хорст и Бассарер использовали исходное питание с крупностью –1,7 мм, как и в методе Берри-

Брюса для нестандартной лабораторной мельницы. Суть метода заключается в следующем:

1. Измеряется гранулометрический состав питания для эталонной руды.

2. Проба эталонной руды (с известным индексом Бонда) измельчается за определенный отрезок времени до достижения желаемой крупности.

3. Три пробы исследуемой руды при тех же условиях измельчаются с различными периодами времени, включая времена более короткие и более длительные, чем в шаге 2.

4. Результаты ситовых анализов продуктов от трех опытов сводятся к уравнению кинетики:

$$\ln(m_i) = \ln(m_{0i}) - kt, \quad (5)$$

где  $m_i$  — суммарная масса фракции, остающейся на  $i$ -м сите;  $m_{0i}$  — суммарная масса фракции, остающейся на  $i$ -м сите в нулевой момент времени;  $k_i$  — коэффициент измельчения фракции крупности размера  $i$ -го сита;  $t$  — время.

5. Рассчитывается гранулометрический состав продукта измельчения исследуемой пробы с использованием коэффициентов уравнения из п. 4, но при исходном гранулометрическом составе, как у эталонной пробы.

6. Из шага 5 оценивается 80% проход измельченного продукта.

7. Определяется рабочий индекс неизвестной руды по уравнению Берри-Брюса.

Фактически, определяется, какой гранулометрический состав должна получить исследуемая руда, если бы ее исходный гранулометрический состав полностью соответствовал исходному гранулометрическому составу эталонной руды.

Этот метод считается более точным, чем метод Берри и Брюса, однако следует учитывать, что не все руды соответствуют простому уравнению первого порядка. Данный метод был опробован

на пробе апатит-нефелиновой руды и показал относительную ошибку 8,44%.

#### Метод компании Анаконда

Йап и др. [20] предложили свой метод определения  $BW_i$ , позволяющий использовать любую шаровую мельницу. Он подобен методам Берри-Брюса и Хорста-Бассарера, однако не требует наличия эталонной руды в отдельно взятом тесте. Вместо этого требуется калибровка шаровой мельницы, отличной от мельницы Бонда, которая будет использоваться в дальнейшем для тестирования.

Его суть заключается в следующем. Устанавливаются условия, по возможности как можно ближе к соответствующим условиям в методологии теста Бонда:

- габариты барабана мельницы;
- шаровая загрузка;
- крупность питания (из питания удаляется готовый класс);
- скорость вращения мельницы.

Индекс рассчитывается из следующего уравнения:

$$BW_i = \frac{\alpha \bar{E}}{10} \cdot \left( \frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)^{-1}, \quad (6)$$

где  $\alpha$  — коэффициент пропорциональности;  $\bar{E}$  — удельная энергия разрушения в открытом цикле.

Калибровка мельницы заключается в подборе для нее выражения  $A = \alpha \bar{E} / 10$  методом наименьших квадратов таким образом, чтобы минимизировать среднюю относительную ошибку между актуальным индексом  $BW_i$  и индексом, полученным на калибруемой мельнице по следующему выражению:

$$A = \frac{\sum_{j=1}^n BW_{ij} \cdot \left( 1 / \sqrt{P_{80}} - 1 / \sqrt{F_{80}} \right)_j^{-1}}{\sum_{j=1}^n \left( 1 / \sqrt{P_{80}} - 1 / \sqrt{F_{80}} \right)_j^{-2}}. \quad (7)$$

Йап и Сепульведа калибровали свою мельницу с помощью 19 проб различ-

ных типов руд. Для каждой из них был проведен стандартный тест Бонда и измельчение в калибруемой мельнице на протяжении 10 мин. Диаметр барабана составил 25,1 см и длина 21 см, измельчающая среда состояла из стальных шаров (см. табл. 1), скорость вращения —  $92 \text{ мин}^{-1}$  или 96% от критической, масса загружаемой пробы 1 кг, крупность —  $1700+147 \text{ мкм}$ , использовалось мокрое измельчение при содержании твердого 50%тв. Производился мокрый рассев питания и продукта измельчения. Йап и Сепульведа для выбранной ими мельницы получили  $A = 0,5031$ .

Заявленная средняя относительная ошибка для более чем двадцати проб составила 4,1%.

#### *Ахмади и Шахсавари*

Ахмади и Шахсавари [21] изложили в новой редакции метод Магдалиновича [22]. В их методе используется стандартная мельница и шаровая нагрузка Бонда  $M$ .

Суть метода заключается в следующем:

1. Подготавливаются две идентичные навески, представляющие из себя  $2,5M/3,5 = M_c$  массы надрешетного продукта и  $1/3,5$  массы представительной исходной пробы.

2. Первая проба помещается в мельницу и измельчается 100 оборотов.

3. После измельчения вся проба классифицируется по контрольному классу, и регистрируется масса надрешетного продукта  $M_{os}$ . Эта масса должна быть равна массе  $M_c$  при циркуляции 250%.

4. Вычисляется константа измельчения крупного класса  $K$  из выражения

$$K = \frac{n(\ln M_c - \ln M_{os})}{N}, \quad (8)$$

где  $n$  — число оборотов мельницы в минуту;  $N$  — число оборотов мельницы в первом цикле измельчения.

Таблица 1

**Шаровая загрузка мельницы, использованная в методе Йапа и Сепульведы**  
*Mill ball load in the Yap–Sepulveda method*

Диаметр шаров, мм	Количество шаров, шт	Масса, г
35,6–38,1	11	2316,5
31,8–33,0	17	2325,4
29,2–31,0	13	1534,8
25,4–27,9	10	822,5
24,1–25,4	7	449,7
22,9–24,1	30	1634,0
Итого	88	9082,9

5. Общее число оборотов мельницы для второго цикла измельчения  $N_z$  рассчитывается из выражения

$$N_z = n \ln(1 + 0,4 B_0) / k, \quad (9)$$

где  $m_0$  — доля верхнего класса в исходной пробе.

6. После второго периода измельчения продукт мельницы классифицируется по контрольному классу и для подрешетного определяется  $P_{80}$ . Надрешетный продукт должен быть приблизительно равным  $2,5M/3,5M$ .

7. Индекс  $BW_i$  определяется по стандартному уравнению Бонда с использованием измельчаемости, полученной во втором периоде измельчения.

Данный метод был опробован на пробе апатит-нефелиновой руды и показал относительную ошибку 7,0%.

#### *Капур*

В данном методе [23] используется та же мельница и условия измельчения, что и в стандартном тесте Бонда. Суть данного метода заключается в использовании следующего эмпирического уравнения:

$$BW_i = K [P_i]^a [G_2]^b [R_0 M_1]^c [1 - R_0]^d, \quad (10)$$

где  $P_i$  — размер ячейки контрольного сита, мкм;  $G_2$  — параметр измельчаемости во втором цикле измельчения, г/об;

$R_0$  — массовая доля надрешетного продукта в исходном материале, д.ед.;  $M_1$  — масса загрузки мельницы, г;  $K, a, b, c, d$  — безразмерные эмпирические коэффициенты, зависящие от физико-механических характеристик руды.

Результаты уравнения Капура при его использовании с общими коэффициентами на практике имеют среднюю относительную ошибку 9,4%. Метод Капура был опробован на 37 пробах различных типов руд и показал среднюю относительную ошибку 8,6%.

#### Карра

Карра [24] модифицировал алгоритм Капура и предложил другое эмпирическое уравнение для вычисления индекса Бонда, в котором также используется измельчаемость Бонда, и лишь два цикла измельчения:

$$BW_i = 9,934 \cdot P^{0,308} G_2^{-0,696} F_{80}^{-0,125}. \quad (11)$$

Заявленная автором средняя относительная ошибка составила 5,0%, что является лучшим результатом, чем у метода Капура. Метод Карра был опробован на 22 пробах различных типах руд и показал среднюю относительную ошибку 5,5%.

#### Смит и Ли

Смит и Ли [25] провели стандартный тест Бонда для 8 типов минерального сырья по пяти классам крупности готового продукта и на основе этого исследования предложили в общем виде альтернативный способ получения рабочего индекса Бонда по формуле:

$$BW_i = \frac{16}{G^{0,82}} \sqrt{\frac{P}{100}}, \quad (12)$$

где  $G$  — измельчаемость в первом цикле Бонда, г/об;  $P$  — верхний предел крупности готового класса, мкм.

Заявленная средняя относительная ошибка для данного метода по данным, полученным авторами, равна 8,2%. Дан-

ный метод был опробован на 44 пробах различных типов руд и показал среднюю относительную ошибку 16,6%.

#### Гарешли

Суть данной работы [26] заключается в оценке рабочего индекса измельчения Бонда через классические испытания по определению параметров кинетики измельчения со временами измельчения 0,33, 1, 2, 4 и 8 мин по всем интересующим классам крупности в той же мельнице и при тех же условия измельчения, что и в стандартном тесте Бонда. Расчет рабочего индекса шарового измельчения Бонда после проведения испытания может осуществляться с одинаковым успехом по любому контрольному ситу.

Тестирование проводится по следующему алгоритму:

1. Подготавливается проба крупностью  $-3,35$  мм массой около 10 кг.
  2. Определяется масса  $M_0$  представительной навески из исходной пробы крупностью  $-3,35$  мм, плотно утрамбованной на вибрационной плите в сосуд объемом 700 мл.
  3. Производится гранулометрический анализ исходной пробы.
  4. Подготавливается 5 представительных проб массой  $M_0$ .
  5. Пробы измельчаются 0,33, 1, 2, 4 и 8 мин.
  6. Производится гранулометрический анализ 5 продуктов измельчения.
  7. Время измельчения переводится в число оборотов мельницы  $N_R$ .
  8. Находятся коэффициенты  $a$  и  $b$  степенной зависимости между числом оборотов мельницы  $N_R$  и новообразованным готовым классом  $G_{Net}$
- $$N_R = a(G_{Net})^b. \quad (13)$$

9. Находятся коэффициенты  $a_1, a_2, a_3, a_4$  полиномиальной зависимости между показателем крупности продукта  $P_{80}$  и числом оборотов мельницы  $N_R$

$$P_{80} = a_1 N_R^3 + a_2 N_R^2 + a_3 N_R + a_4. \quad (14)$$

10. Требуемый новообразованный готовый класс при 250% циркуляции  $G_{Net(250\%)}$  рассчитывается по выражению

$$G_{Net(250\%)} = (M_0 / 3,5) - G_{feed}, \quad (15)$$

где  $G_{feed}$  — масса готового класса в исходной пробе перед измельчением.

11. Рассчитывается число оборотов для достижения 250% циркуляции  $N_{R(250\%)}$  путем использования найденной необходимой массы новообразованного готового класса из шага 10 в уравнении с коэффициентами из шага 8.

12. Рассчитывается параметр  $P_{80}$  с помощью уравнения и коэффициентов, найденных в шаге 9 с использованием числа оборотов, найденных в шаге 11.

13. Рассчитывается измельчаемость по Бонду  $G_{bp}$  по выражению

$$G_{bp} = \frac{G_{Net(250\%)}}{N_{R(250\%)}}. \quad (16)$$

14. Рассчитывается индекс  $BW_i$  по стандартной формуле Бонда.

Заявленная относительная ошибка лежит в пределах 4,5%. Данный метод был опробован на пробе апатит-нефелиновой руды и показал относительную ошибку 3,5%.

#### Сокращенный тест Бонда компании JKTech (JKBBM)

Методология тестирования [27] была получена компанией JKTech после статистической обработки данных порядка 1400 стандартных тестов шарового измельчения Бонда. JKTech показала, что для получения воспроизводимости теста достаточно проведение лишь трех первых циклов теста Бонда с последующей математической обработкой полученных результатов. При данном методе тестирования используется стандартная мельница Бонда. После трех циклов измельчения производится рассев под-

решетного продукта третьего цикла, индекс Бонда компания JKTech рассчитывает по результатам, полученным в лаборатории. Заявленная средняя относительная ошибка составляет менее 4,1%.

Данный метод был опробован на четырех пробах различных типов руд и показал среднюю относительную ошибку 3,5%.

#### Льюис и др.

Метод Льюиса [28] сформировался после получения функций появления для  $n$  классов крупности для последующего их использования в кумулятивной модели измельчения:

$$R_i(t) = \sum_{n=1}^i a_{ni} \cdot \exp(-k_n \cdot t), \quad (17)$$

где при  $n \neq i$  соблюдается равенство

$$a_{ni} = \frac{\sum_{j=n}^{i-1} (k_j \cdot b_{ij} \cdot a_{nj})}{k_i - k_n}, \quad (18)$$

а при  $n = i$  соблюдается равенство

$$a_{ii} = W_i(0) - \sum_{n=1}^{i-1} a_{ni}, \quad (19)$$

где  $R_i(t)$  — масса класса  $i$  после времени измельчения  $t$ ;  $k_i$  — селективная функция для крупности  $i$ ;  $b_{ij}$  — функция появления. Вычисляются эти функции следующим образом:

$$k_i = S1000 \cdot \left( \frac{X_i}{1000} \right)^\alpha; \quad (20)$$

$$b_{ij} = B_{ij} - B_{i+1,j}; \quad (21)$$

$$B_{ij} = \Theta \cdot \left( \frac{X_i}{X_j} \right)^\gamma + (1 - \Theta) \cdot \left( \frac{X_i}{X_j} \right)^\beta, \quad (22)$$

где  $X_i$  — средняя геометрическая крупность для класса крупности  $i$ , мкм; S1000,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  — необходимые параметры модели для каждой исследуемой пробы. Время измельчения  $t$  вычисляется из количества оборотов.



Используя эту модель уже после первого цикла измельчения можно получить функцию появления для некоторого набора классов крупности, после чего расчитать все последующие периоды до стабилизации процесса на необходимой (250%) циркулирующей нагрузке, расчитать таким образом и измельчаемость в последних циклах, и крупность продукта измельчения. На последнем этапе — использовать стандартную формулу Бонда. Заявленная средняя относительная ошибка составляет менее 3,5%.

#### *Сокращенный тест Бонда компании Aminpro (MiniBond)*

Данный метод [29] является частью серии тестов Metsuite от компании Aminpro и направлен на массовое опробование для осуществления картирования месторождений по рабочему индексу шарового измельчения Бонда. Суть данного метода заключается в проведении одного опыта измельчения пробы массой 600 г в мельнице, представляющей из себя половину барабана стандартной шаровой мельницы Бонда с соответствующей шаровой загрузкой. Для осуществления серии тестов первоначально необходимо откалибровать математический аппарат метода на стандартной шаровой мельнице Бонда двумя циклами измельчения. После калибровки данный метод позволяет определять рабочий индекс шарового измельчения Бонда серии проб со средней относительной ошибкой в пределах 3,0.

#### *Аксани и Сомнез*

Авторами этой работы были упрощены вычисление и экспериментальная процедура определения рабочего индекса шарового измельчения Бонда [30].

Суть работы состоит в использовании математической модели, в основе которой лежит следующее уравнение кинетики:

$$R_{(x,t)} = R_{(x,0)} \cdot \exp(-I \cdot x^n \cdot t), \quad (23)$$

где  $R_{(x,t)}$  — суммарный выход по плюсу на сите с размером ячейки  $x$  в момент времени  $t$ .  $C$  и  $n$  — константы, зависящие от используемой мельницы и характеристик исследуемого материала.

Для определения параметров модели при тестировании необходимо провести измельчение, условия которого должны соответствовать стандартному тесту Бонда. Гранулометрическая характеристика питания первого периода измельчения, масса питания и число оборотов являются исходными данными для расчета следующего цикла измельчения с помощью специально созданного авторами математического аппарата. Продукт разгрузки мельницы используется для вычисления  $P_{80(\text{общ})}$ , после чего из него выделяется готовый класс, для которого так же определяется  $P_{80}$ . Результаты следующего цикла, который будет производиться уже в рамках математической модели, рассчитывают с использованием уравнения кинетики, приведенного выше. В дальнейшем проводится циклический расчет до стабилизации измельчаемости в последних трех циклах, после чего используется стандартное уравнение Бонда для вычисления индекса. Заявленная относительная ошибка для данного метода показана в пределах 4%.

#### *Армстронг*

Армстронг в своей работе [31] показал, что переводной коэффициент из сухого в мокрое измельчение при пересчете с лабораторного индекса шарового измельчения Бонда в промышленный является слишком грубым способом расчета и имеет погрешность. Суть метода заключается в использовании для теста стержневой мельницы диаметром 20,3 см и длиной 25,4 см с мокрым измельчением (60 об/мин, 67%<sub>ТВ</sub>) в открытом

цикле (загрузка представляет из себя 25 стержней диаметром 2,54 см), которая должна давать продукт примерно той же крупности, что и стандартная шаровая мельница Бонда в открытом цикле. Электропотребление мельницы фиксировалось для нахождения точно потребляемой мощности на измельчение. Всего проводится два независимых цикла измельчения с разными временами. После этого вычисляется рабочий индекс шарового измельчения Бонда по формуле:

$$BWi = \frac{0,064}{1,1023 \left( \frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)}, \quad (24)$$

где 0,064 — мощность двигателя использованной мельницы, кВт; 1,1023 — коэффициент перевода короткой тонны в метрическую;  $F_{80}$  — теоретический размер ячейки сита, через которое пройдет 80% массы исходной пробы, мкм;  $P_{80}$  — теоретический размера ячейки сита, через которое пройдет 80% массы конечного продукта, мкм.

Полученная средняя относительная ошибка от рабочего индекса шарового измельчения Бонда составила около 6%, однако в своей работе Армстронг дает понять, что данный индекс не требует переводного коэффициента с сухого на мокрое измельчение, поэтому более пригоден для расчета промышленных мельниц. Данный метод не был опробован в связи с отсутствием специализированного оборудования.

### Обсуждение результатов

Исследованные методы можно разделить на четыре категории [32]:

1. Сравнительные методы, в которых для получения рабочего индекса шарового измельчения используется эталонная руда (Берри-Брюс, Хорст-Бассарер, Анаконда).

2. Эмпирические методы, в которых проводится периодический тест и используется эмпирическое уравнение, производятся с использованием методов регрессии и базы данных руд различного типа (уравнение Капура, Карра, Смит и Ли).

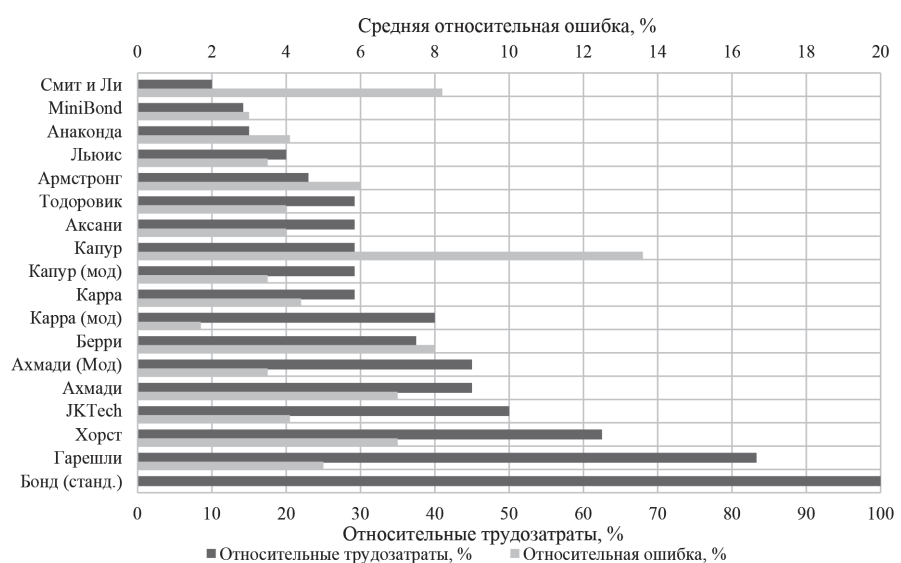


Рис. 1. Альтернативные методы определения рабочего индекса шарового измельчения Бонда  
 Fig. 1. Alternative methods to determine the Bond Ball Mill Work Index

Таблица 2

**Рассмотренные методы определения рабочего индекса шарового измельчения Бонда**  
**Discussed determination procedures of the Bond Ball Mill Work Index**

Метод	$M^1$ , кг	$\Delta_1^2$ , %	$\Delta_2^3$ , %	Примечание
<b>Стандартный метод</b>				
Бонд	10	—	—	Стандартная методология, неизменна с 1961 г.
<b>Альтернативные методы</b>				
Тодоровик	2	4,0	0,3	$\Delta_{cp}$ тем меньше, чем больше число циклов измельчения
Гарешли	10	5,0	3,5	Расчет по любой крупности готового класса
Хорст	5	7,0	8,4	Применима для любых мельниц, требуется эталонная руда
Берри	1	8,0	6,3	Применима для любых мельниц, требуется эталонная руда
JKBVM	4	4,1	3,5	Запатентованный тест
Смит и Ли	2	8,2	16,6	Весьма устаревший метод
Льюис	2	3,5	—	Низкая $\Delta_{cp}$ для гомогенных руд
MiniBond	4	3	—	Запатентованный тест; только для массового тестирования, расчет по любой крупности продукта
Армстронг	3	6,0	—	Тест при мокром измельчении в стержневой мельнице
Аксани	2	4,0	—	Низкая $\Delta_{cp}$ для гомогенных руд
Анаконда	2	4,1	—	Применима для любых мельниц, требуются эталонные руды
Ахмади	5	7,0	6,8	Аналог метода Магдалиновича
Капур	3	8,0	9,5	После калибровки метода для конкретного типа руд значительно снижается $\Delta_{cp}$ (вплоть до 3,5%)
Карра	3	4,4	5,1	Аналог метода Капура
<b>Альтернативные методы, модифицированные авторами статьи</b>				
Ахмади (мод.)	5	—	3,5	Необходимо наличие базы данных
Капур (мод.)	3	—	3,5	Необходимо наличие базы данных
Карра (мод.)	5	—	1,7	При использовании трех циклов
Примечания: 1. $M$ — необходимая масса пробы; 2. $\Delta_1$ — средняя относительная ошибка метода, указанная в первоисточнике; 3. $\Delta_2$ — средняя относительная ошибка метода, лабораторно подтвержденная авторами статьи.				

3. Моделирующие методы, в которых измеряются функции разрушения и селекции руды (обычно со стандартной мельницей Бонда) и вводится модель классификатора, после чего имитируется замкнутый цикл, как в стандартном тесте (Гарешли, Льюис, Ахмади).

4. Короткие методы, опирающиеся, как правило, на эмпирический базис данных тестов, полученных ранее (JK Tech, MiniBond, Армстронг).

В табл. 2 и на рис. 1 представлены средние относительные ошибки результатов и трудозатраты рассмотренных

методов. На рис. 2 представлена блок-схема для выбора подходящего метода для различных условий исследований.

При анализе метода Ахмади было обнаружено, что желаемой циркуляции в 250% не всегда возможно достичь за два цикла измельчения, что приводит к повышению относительной ошибки всего теста. Однако результат удалось значительно улучшить [18, 19] при использовании в первом цикле числа оборотов, способствовавшего приближению к заданной циркуляции во втором цикле. Для этого необходимо иметь результа-

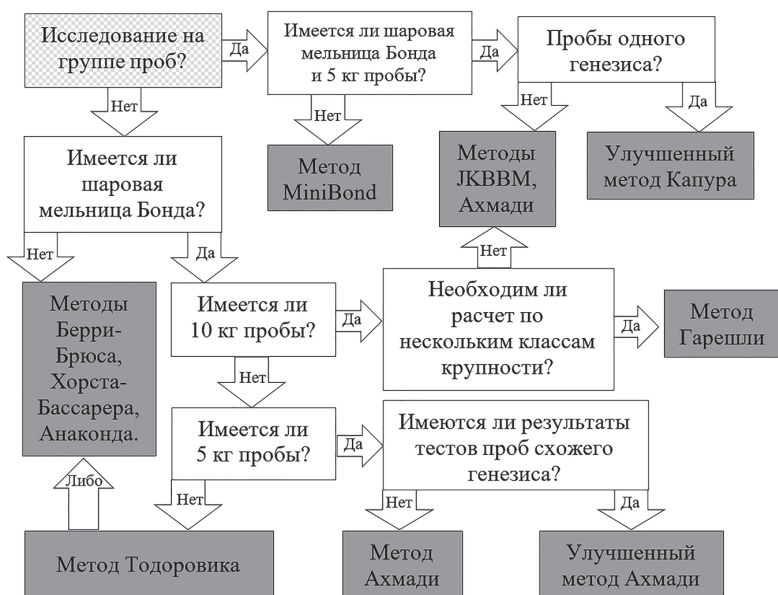


Рис. 2. Блок-схема выбора альтернативного метода определения рабочего индекса шарового измельчения Бонда

Fig. 2. Procedure chart to select alternative determination methods of the Bond Ball Mill Work Index

ты стандартных тестов Бонда на рудах, близких к исследуемой по генезису (см. табл. 3). Из этих тестов необходимо использовать среднеарифметическое значение числа оборотов последних трех циклов измельчения. На одной и той же пробе апатит-нефелиновой руды метод Ахмади показал ошибку 3,5% против 7% в стандартной редакции метода.

При анализе метода Капура было обнаружена корреляция значений ошибок для руд схожих генезисов. В связи с этим было предложено применение уравнения Капура с эмпирическими коэффи-

циентами, найденными для отдельных типов руд, близких по своему генезису. Найденны коэффициенты для апатит-нефелиновых, медно-никелевых, золотоносных руд и окисленных железистых кварцитов [18, 19]. Средняя относительная ошибка данного метода при таком подходе будет лежать в пределах 3–4%.

При анализе метода Карра были определены средние относительные ошибки при использовании трех и четырех циклов измельчения, для которых получены средние относительные ошибки определения индекса  $BW_i$  1,7 и 1,3% соответ-

Таблица 3

**Рекомендуемое число оборотов в первом цикле теста Бонда при ячейке контрольного сита 106 мкм**

**Recommended number of mill revolutions in the first cycle of the Bond Test for sieve size 106  $\mu$ m**

Типы руд	Среднеарифметический индекс $BW_i$ , кВтч/т	Рекомендуемое число оборотов в 1 цикле
Железные	15,53	332
Медно-никелевые	18,79	394
Апатит-нефелиновые	13,20	150
Золотоносные	18,61	312

ственно. При этом должны использоваться эмпирические коэффициенты уравнения, определенные по базе стандартных тестов Бонда для 22 тестов руд с различными контрольными ячейками сита.

Для третьего цикла:

$$W_i = 9,9317 \cdot P_{100}^{0,5362} G_2^{-0,8821} F_{80}^{-0,2711} ;$$

Для четвертого цикла:

$$W_i = 9,1119 \cdot P_{100}^{0,5037} G_2^{-0,8540} F_{80}^{-0,2370} .$$

### Заключение

Были рассмотрены и опробованы наиболее эффективные альтернативные методы определения рабочего индекса шарового измельчения Бонда.

Предложено и разработано:

- для метода Ахмади предложено использование специального числа обо-

ротов в первом цикле измельчения в зависимости от генезиса тестируемого образца, при этом средняя относительная ошибка метода снижается с 7,0 до 3,5%;

- для метода Капура предложено использование специальных эмпирических коэффициентов в зависимости от генезиса тестируемого образца, при этом средняя относительная ошибка метода снижается с 8,0 до 3,5%;

- для метода Карра предложено использование 3 или 4 циклов измельчения при соответствующих эмпирических коэффициентах уравнения, средняя относительная ошибка метода снижается с 5,1 до 1,7%;

- разработана блок-схема для выбора метода в зависимости от задач, стоящих перед исследователем.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гурьев А. А. Устойчивое развитие рудно-сырьевой базы и обогащительных мощностей АО «Апатит» на основе лучших инженерных решений // Записки Горного института. – 2017. – Т. 228. – С. 662–673. DOI: 10.25515/PMI.2017.6.662.

2. Tsvetkova A., Katysheva E. Ecological and economic efficiency evaluation of sustainable use of mineral raw materials in modern conditions // 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017. 2017. Vol. 17. No 53. Pp. 241–248. DOI: 10.5593/sgem2017/53/S21.030.

3. Vasilev Y., Vasileva P. Effects of coal preparation and processing in the Russian coal value chain // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018. 2018. Vol. 18, No 5.3. Pp. 319–326 DOI: 10.5593/sgem2018/5.3.

4. Bond F. C. Crushing and grinding calculations. Allis-Chalmers: Allis-Chalmers press. 1961, p. 16.

5. Giblett A., Morrell S. Process development testing for comminution circuit design // Minerals and Metallurgical Processing. 2016. Vol. 33. No 4. Pp. 172–177.

6. Burke J. M. Determining the Bond Efficiency of industrial grinding circuits // Global Mining Standards and Guidelines Group. 2015. <https://gmgroup.org/guidelines/determining-the-bond-efficiency-of-industrial-grinding-circuits/>.

7. Федотов К. В., Сенченко А. Е., Куликов Ю. В. Современные методики исследований для разработки рациональной технологии рудоподготовки / Конгресс обогащителей стран СНГ. – М.: МИСиС, 2011.

8. Таранов В. А., Баранов В. Ф., Александрова Т. Н. Обзор программ по моделированию и расчету технологических схем рудоподготовки // Обогащение руд. – 2013. – № 5. – С. 3–7.

9. Nikolaeva N., Aleksandrova T., Romashev A. Effect of grinding on the fractional composition of polymineral laminated bituminous shales // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2017. Vol. 39. No 4. Pp. 231–234.

10. Nikolaeva N., Romashev A., Aleksandrova T. Degree evaluation of grinding on fractional composition at destruction of polymineral raw materials / IMPC 2018 – 29th International Mineral Processing Congress. 2019, pp. 474–480.

11. Таловина И.В., Александрова Т.Н., Попов О.А., Либервирт Х. Сравнительный анализ исследования структурно-текстурных характеристик горных пород методами компьютерной рентгеновской микротомографии и количественного микроструктурного анализа // Обогащение руд. — 2017. — № 3. — С. 56 — 62.
12. Тихонов Н.О., Скарин О.И. Расчет мельниц полусамоизмельчения по энергетическим индексам // Горный журнал. — 2014. — № 11. — С. 6 — 10.
13. *Napier-Munn T.J., Morrell S., Morrison R., Kojovic T.* Mineral comminution circuits: their operation and optimization. 3rd edition. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, University of Queensland, 2005.
14. Lvov V., Sishchuk J., Chitalov L. Intensification of Bond ball mill work index test through various methods // 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017. 2017. Vol. 17. No 11. Pp. 857 — 864.
15. Львов В.В., Читалов Л.С. Методы интенсификации индекса чистой работы шарового измельчения Бонда // Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья (Плаксинские чтения–2017): сборник научных статей. — Красноярск, 2017. — С. 128 — 131.
16. *Gupta A., Yan D. S.* Mineral processing design and operation, Elsevier, 2006. Pp. 82 — 89.
17. *Todorovic D., Trumic M., Andric L., Milosevic V., Trumic M.* A quick method for Bond work index approximate value determination // Physicochemical Problems of Mineral Processing. 2017. Vol. 53. No 1. Pp. 321–332.
18. *Berry T. F., Bruce R. W.* A simple method of determining the grindability of ores // Canadian Mining Journal. 1966. July, p. 41.
19. *Horst W. E., Bassarear J. H.* Use of simplified ore grindability technique to evaluate plant performance // Trans. SME/AIME 260. 1976, p. 348.
20. Yap R., Sepuvela J., Jauregui R. Determination of the Bond work index using an ordinary laboratory batch ball mill / Design and Installation of Comminution Circuits. New York, 1982, pp. 176 — 203.
21. *Ahmadi R., Shahsavari Sh.* Procedure for determination of ball Bond work index in the commercial operations // Minerals Engineering. 2009. Vol. 22. Pp. 104 — 106.
22. *Magdalinovich N.* A procedure for rapid determination of the Bond work index // International Journal of Mineral Processing. 1989. Vol. 27. Pp. 125 — 132.
23. *Kapur P. C.* Analysis of the Bond grindability test // Institution of Mining & Metallurgy. 1970. Vol. 79. IV. No 763. Pp. 103 — 107.
24. *Karra V. K.* Simulation of Bond grindability tests // CIM Bull. 1981. Vol. 74. Pp. 195 — 199.
25. *Smith R., Lee K.* A comparison of data from Bond type simulated closed circuit and batch type grindability tests // American Institute of Mining and Metallurgical Engineers. 1968. Vol. 241. Pp. 91 — 99.
26. *Gharegheshlagh H. H.* Kinetic grinding test approach to estimate the Ball mill Work index // Physicochemical Problems of Mineral Processing. 2016. Vol. 52. No 1. Pp. 342 — 352.
27. *JKTech SMI Technology transfer — Introducing the Bond Ball Lite Test (JKBBL).* <https://jktech.com.au/sites/default/files/JKTech%20JK%20Bond%20Ball%20Mill%20Test%20-%20FINAL%20161117%20%28web%29.pdf> (дата обращения 13.03.2020).
28. *Lewis K. A., Pearl M., Tucker P.* Computer simulation of the Bond grindability test // Minerals Engineering. 1990. Vol. 3. Pp. 199 — 206.
29. *Berrios P., Amelunxen R., Rodriguez E., Mesa D., Becerra M., Medina M., Amelunxen P.* The MiniBond test: description, calibration and sources of error // Materials of the Procemin GEOMET Conference, 2019, pp. 1 — 12.
30. *Aksani B., Sonmez B.* Technical note simulation of Bond grindability test by using cumulative based kinetic model // Minerals Engineering. 2000. Vol. 13. No. 6. Pp. 673 — 677.
31. *Armstrong D.* An alternative grindability test. An improvement of the Bond procedure // International Journal of Mineral Processing. 1986. Vol. 16. Pp. 195 — 208.

32. Wright J. Modified Bond ball mill work index test: [Электронный ресурс] // 911Metallurgist: [сайт]. [2019] URL: <https://www.911metallurgist.com/grinding/modified-bond-ball-mill-work-index-test-what-is/> (дата обращения 13.03.2020). **ГИАБ**

## REFERENCES

1. Guryev A.A. Sustainable development of the ore-raw material base and processing facilities of Apatit JSC based on the best engineering solutions. *Journal of Mining Institute*. 2017, vol. 228, pp. 662 – 673. [In Russ]. DOI: 10.25515/PMI.2017.6.662.
2. Tsvetkova A., Katysheva E. Ecological and economic efficiency evaluation of sustainable use of mineral raw materials in modern conditions. *17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017*. 2017. Vol. 17. No 53. Pp. 241 – 248. DOI: 10.5593/sgem2017/53/S21.030.
3. Vasilev Y., Vasileva P. Effects of coal preparation and processing in the Russian coal value chain. *18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018*. 2018. Vol. 18, No 5.3. Pp. 319 – 326 DOI: 10.5593/sgem2018/5.3.
4. Bond F.C. *Crushing and grinding calculations*. Allis-Chalmers: Allis-Chalmers press. 1961, p. 16.
5. Giblett A., Morrell S. Process development testing for comminution circuit design. *Minerals and Metallurgical Processing*. 2016. Vol. 33. No 4. Pp. 172 – 177.
6. Burke J.M. *Determining the Bond Efficiency of industrial grinding circuits*. Global Mining Standards and Guidelines Group. 2015, available at: <https://gmgroup.org/guidelines/determining-the-bond-efficiency-of-industrial-grinding-circuits/>.
7. Fedotov K. V., Senchenko A. E., Kulikov Yu. V. Modern research methods for the development of rational comminution technology. *Kongress obogatitelej stran SNG* [CIS Mineral processing congress], Moscow, MISiS, 2011.
8. Taranov V.A., Baranov V.F., Aleksandrova T. N. Review of software tools for modeling and calculation of ore preparation flowsheets. *Obogashchenie Rud*. 2013, no 5, pp. 3 – 7. [In Russ].
9. Nikolaeva N., Aleksandrova T., Romashev A. Effect of grinding on the fractional composition of polymineral laminated bituminous shales. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2017. Vol. 39. No 4. Pp. 231 – 234.
10. Nikolaeva N., Romashev A., Aleksandrova T. Degree evaluation of grinding on fractional composition at destruction of polymineral raw materials. *IMPC 2018 – 29th International Mineral Processing Congress*. 2019, pp. 474 – 480.
11. Talovina I.V., Aleksandrova T.N., Popov O., Lieberwirth H. Comparative analysis of rocks structural-textural characteristics studies by computer X-ray microtomography and quantitative microstructural analysis methods. *Obogashchenie Rud*. 2017, no 3, pp. 56 – 62. [In Russ].
12. Tikhonov N. O., Skarin O. I. Semiautogenous grinding mills' capacity calculation by energy indices. *Gornyi Zhurnal*. 2014, no 11, pp. 6 – 10. [In Russ].
13. Napier-Munn T.J., Morrell S., Morrison R., Kojovic T. *Mineral comminution circuits: their operation and optimization*. 3rd edition. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, University of Queensland, 2005.
14. Lvov V., Sishchuk J., Chitalov L. Intensification of Bond ball mill work index test through various methods. *17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017*. 2017. Vol. 17. No 11. Pp. 857 – 864.
15. Lvov V.V., Chitalov L.S. Methods of Bond work ball mill index intensification. *Sovremennye problemy kompleksnoj pererabotki trudnoobogatimyh rud i tekhnogennogo syr'ya (Plaksinskie chteniya-2017)* [Modern problems of complex processing of hard-to-concentrate ores and industrial raw materials (Plaksin's Lectures-2017)]. Krasnoyarsk, 2017, pp. 128 – 131. [In Russ].
16. Gupta A., Yan D.S. *Mineral processing design and operation*, Elsevier, 2006. Pp. 82 – 89.
17. Todorovic D., Trumic M., Andric L., Milosevic V., Trumic M. A quick method for Bond

work index approximate value determination. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2017. Vol. 53. No 1. Pp. 321–332.

18. Berry T. F., Bruce R. W. A simple method of determining the grindability of ores. *Canadian Mining Journal*. 1966. July, p. 41.

19. Horst W. E., Bassarear J. H. *Use of simplified ore grindability technique to evaluate plant performance*. Trans. SME/AIME 260. 1976, p. 348.

20. Yap R., Sepuvelda J., Jauregui R. Determination of the Bond work index using an ordinary laboratory batch ball mill. *Design and Installation of Comminution Circuits*. New York, 1982, pp. 176 – 203.

21. Ahmadi R., Shahsavari Sh. Procedure for determination of ball Bond work index in the commercial operations. *Minerals Engineering*. 2009. Vol. 22. Pp. 104 – 106.

22. Magdalinovich N. A procedure for rapid determination of the Bond work index. *International Journal of Mineral Processing*. 1989. Vol. 27. Pp. 125 – 132.

23. Kapur P. C. Analysis of the Bond grindability test. *Institution of Mining & Metallurgy*. 1970. Vol. 79. IV. No 763. Pp. 103 – 107.

24. Karra V. K. Simulation of Bond grindability tests. *CIM Bull*. 1981. Vol. 74. Pp. 195 – 199.

25. Smith R., Lee K. A comparison of data from Bond type simulated closed circuit and batch type grindability tests. *American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*. 1968. Vol. 241. Pp. 91 – 99.

26. Gharegheshlagh H. H. Kinetic grinding test approach to estimate the Ball mill work index. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2016. Vol. 52. No 1. Pp. 342 – 352.

27. JKTech SMI Technology transfer – *Introducing the Bond Ball Lite Test (JKBBL)*, available at: <https://jktech.com.au/sites/default/files/JK%20Tech%20JK%20Bond%20Ball%20Mill%20Test%20-%20FINAL%20161117%20%28web%29.pdf> (accessed 13.03.2020).

28. Lewis K. A., Pearl M., Tucker P. Computer simulation of the Bond grindability test. *Minerals Engineering*. 1990. Vol. 3. Pp. 199 – 206.

29. Berríos P., Amelunxen R., Rodríguez E., Mesa D., Becerra M., Medina M., Amelunxen P. The MiniBond test: description, calibration and sources of error. *Materials of the Procemin G EOMET Conference*, 2019, pp. 1 – 12.

30. Aksani B., Sonmez B. Technical note simulation of Bond grindability test by using cumulative based kinetic model. *Minerals Engineering*. 2000. Vol. 13. No. 6. Pp. 673 – 677.

31. Armstrong D. An alternative grindability test. An improvement of the Bond procedure. *International Journal of Mineral Processing*. 1986. Vol. 16. Pp. 195 – 208.

32. Wright J. *Modified Bond ball mill work index test*, available at: <https://www.911metallurgist.com/grinding/modified-bond-ball-mill-work-index-test-what-is/> (accessed 13.03.2020).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Читалов Леонид Сергеевич<sup>1</sup> – аспирант, e-mail: leo-need@bk.ru,

Львов Владислав Валерьевич<sup>1</sup> – канд. техн. наук, доцент,  
e-mail: Lvov\_VV@pers.spmi.ru,

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет.

**Для контактов:** Читалов Л.С., e-mail: leo-need@bk.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

L.S. Chitalov<sup>1</sup>, Graduate Student, e-mail: leo-need@bk.ru,

V.V. Lvov<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, e-mail: Lvov\_VV@pers.spmi.ru,

<sup>1</sup> Saint-Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Russia.

**Corresponding author:** L.S. Chitalov, e-mail: leo-need@bk.ru.

Получена редакцией 18.03.2020; получена после рецензии 13.08.2020; принята к печати 10.12.2020.

Received by the editors 18.03.2020; received after the review 13.08.2020; accepted for printing 10.12.2020.