

УДК 622.7

**ВЛИЯНИЕ ДИАМЕТРА ШАРОВ НА ПАРАМЕТРЫ
ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ НЕФЕЛИНОВОГО СИЕНИТА**

Ш. Ханер

*Университет в Афьонкарахисаре,
E-mail: shaner@aku.edu.tr, г. Афьонкарахисар, Турция*

Рассмотрены изменения удельной скорости измельчения и функции распределения степени измельчения образцов нефелинового сиенита с помощью шаров из легированной стали различных диаметров. Исследовано распределение частиц по размеру. Установлено, что при увеличении диаметра шаров повышается скорость измельчения.

Нефелиновый сиенит, функция измельчения, удельная скорость измельчения, мелкий помол

DOI: 10.15372/FTPRPI20200521

Материалы, содержащие полевого шпат, используются в плавильных печах при производстве керамики и стекла. На территории Турции расположены месторождения высококачественного полевого шпата, составляющие ~ 14 % от мировых запасов. Гранитные породы, нефелиновый сиенит, гранит, гранитный песок и пегматит добываются в качестве коммерческого источника полевого шпата.

Нефелиновый сиенит — светлая, крупнозернистая, полевошпатовая, магматическая порода с низким содержанием кремния (< 60 %). Он применяется в стекольной и керамической промышленности, поэтому важно выбрать точный размер шаров для измельчения сырьевого материала до желаемой фракции за оптимальное время. Сиенит обладает высоким соотношением Na : K по сравнению с другими полевошпатовыми породами и входит в перечень промышленных материалов в качестве источника оксида алюминия (> 23 %) и щелочи. Экономически выгодные для добычи месторождения нефелинового сиенита находятся в России, Канаде, Бразилии, США, Китае и Турции [1, 2].

В Турции добыча и переработка нефелинового сиенита началась в 2008 г. частной компанией в районе Акпынар (область Бузлукдаги, г. Кыршехир). Разведанная область запасов нефелинового сиенита имеет длину 2250 м, ширину 1850 м и глубину 450 м [1]. Рядом расположен обогатительный комбинат, где осуществляется дробление, измельчение, мокрое магнитное обогащение и сушка породы. Высушенное сырье подвергается сухому магнитному обогащению для повышения соотношения содержания $K_2O : Na_2O$ и удаления железосодержащих элементов и других загрязнителей [3], затем сиенит поступает на продажу.

Обогащенный нефелиновый сиенит используется в керамической промышленности. На заводы он поступает с размером частиц -0.5 мм в результате первого измельчения. Для дальнейшего измельчения применяются шаровые мельницы. Кварц, полевошпатовый и нефелиновый сиенит измельчаются до -0.06 мм. При уменьшении размера частиц минералов в них сокращаются структурные дефекты, а при разрушении рабочих частей мельниц возникает износ. В [4] отмечается, что большая часть энергии, расходуемой на помол, превращается в тепло, поэтому наблюдается низкая экономическая эффективность работы шаровых мельниц при помоле частиц размером <0.1 мм. При уменьшении размера частиц удельная энергия шаровой мельницы экспоненциально увеличивается.

В [5] рассмотрены затраты на производство керамических товаров (кафеля, посуды, сантехнического оборудования, кирпича, плотной глины) и установлено, что основные факторы — температура обжига и его продолжительность. Большую долю расходов керамического производства составляют издержки горнодобывающей компании на сырье, а также подготовка сырья к обработке до процесса обжига. При изготовлении настенной кафельной плитки сумма перечисленных затрат составляет 58 % от общих производственных, остальные 42 % приходятся на потребление природного газа [6]. Необходимо добиться оптимальных параметров измельчения сырьевого материала. Согласно [7], наиболее дорогостоящий процесс на обогатительных комбинатах — измельчение руды (50–60 % от общих расходов). По многим параметрам этот процесс определяет качество последующих. Следует выбирать подходящее оборудование, устанавливать оптимальные эксплуатационные параметры, а также фиксировать влияние изменения этих параметров на результат.

Помол — завершающая стадия измельчения. Ввиду различного оборудования, окончательного распределения частиц по размеру и разных механизмов помола делят на грубый, средний и тонкий. Для грубого применяется мельница AG/SAG ($F_{80} = 0.50 - 10$ мм), для среднего — шаровая или башенная мельница ($F_{80} = 0.040 - 0.400$ мм), для тонкого — мельница с перемешиванием мелющей среды ($F_{80} < 0.030$ мм), где F_{80} — размер разгрузочной щели, через которую проходит 80 % материала, мм) [8].

Размер измельчаемого материала влияет на производительность и эффективность мельниц. В [9–12] показано несколько подходов к выбору оптимального размера при среднем помоле с помощью шаровой мельницы. В промышленности используется уравнение, предложенное Бондом в 1958 г.:

$$B = \left(\frac{F_{80}}{K} \right)^{0.5} \left(\frac{S W_i}{C_s D^{0.5}} \right)^{1/3},$$

где B — рекомендуемый размер шара, дюйм; F_{80} — циркуляционная нагрузка с 80 % пропускного размера, мкм; K — постоянная (для мокрых мельниц с центральной разгрузкой $K = 350$); W_i — рабочий индекс Бонда, кВт·ч/т; S — относительная плотность руды; C_s — скорость вращения мельницы по отношению к максимальной, %; D — внутренний диаметр мельницы, фут.

Расчеты по методу Бонда требуют больше времени и не дают точных размеров фракций частиц, поэтому разработаны математические модели. В кинетической модели математические выражения определяют скорость разрушения и функцию распределения разрушения сырьевого

материала [13]. Полученный в ходе лабораторных исследований кинетической модели массив данных подходит для моделирования в промышленной среде [14]. С помощью этой модели установлены параметры разрушения нефелинового сиенита.

Цель настоящей работы — исследование изменений удельной скорости и функции распределения разрушения нефелинового сиенита с помощью шаров из легированной стали пяти разных размеров.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В испытаниях использовался нефелиновый сиенит, добытый компанией в районе Акпынар, г. Кыршехир (Турция). Ниже представлен его химический состав и весовая доля:

SiO ₂	65.22
Al ₂ O ₃	19.47
K ₂ O	8.74
Na ₂ O	5.00
CaO	1.04
MgO	0.03
Fe ₂ O ₃	0.29
TiO ₂	0.07
MnO	0.01
Потери при прокаливании	0.13

Выполнен анализ различных шлифов породы нефелинового сиенита (рис. 1). Установлено содержание 30–35 % нефелина, 25–30 % ортоклаза, 10–15 % микроклина, 8–10 % плагиоклаза (альбит-олигоклаз), 4–5 % биотита, 3–7 % клинопироксена (эгирин-авгит), 2–5 % опоковых минералов. Равнозернистая/полнокристаллическая структура доминирует в породе.

Нефелин обладает гипидиоморфной, аутоморфной, угловатой, полуугловатой, зернистой/кристаллической структурой в форме призматических кристаллов с гладкими свежеобнаженными поверхностями, ограничивающими двойникование, а также двойным преломлением со светлым серо-бежевым оттенком с ортоклазом, наполовину сформированными и угловатыми пертитовыми структурами. В качестве включений обнаружены эпидот и рутил. Порода характеризуется слабовыраженной серитизацией и локальным двойникованием. Плагиоклаз представляет собой олигоклаз в полусамостоятельной форме, с полисинтетическим двойникованием, с участком альбита (углы падения 10–12°). Микроклин имеет полусамостоятельную форму, наполовину угловатую структуру, полисинтетическое двойникование в два направления, а также темные серо-дымчатые преломления. Биотит находится в форме полусамостоятельных хлоридизованных кристаллов, в местах раскола присутствуют опоковые отложения. После хлоридизации биотит приобрел светло-зеленый и светлый коричнево-желтоватый оттенок на цветах преломления. Опоковый минерал обладает наполовину угловатой, разъеденной структурой с магматической коррозией и локальными скелетообразными структурами. Они случайно распределяются по поверхности и визуально определяются как магнетит. Эгирин-авгит (клинопироксен) имеет форму распределенных, полуаморфных, фрагментарно поврежденных частиц с остаточным псевдоморфным цветом.

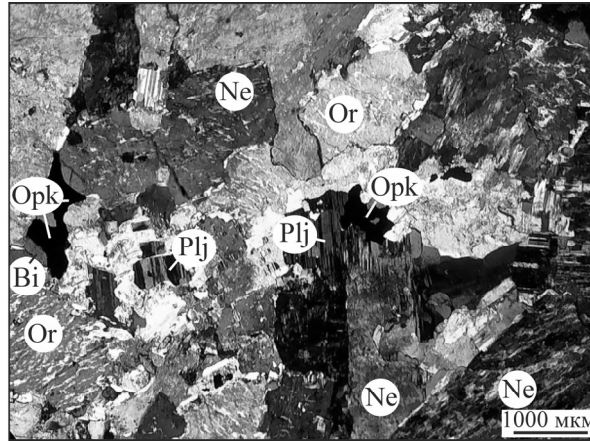


Рис. 1. Шлиф нефелинового сиенита: Ne — нефелин; Or — ортоклаз; Plj — плагиоклаз; Bi — биотит; Ork — опоквый минерал

На первой стадии определяется измельчаемость нефелинового сиенита методом Хардгрова (HGI). Сам сиенит необходимо распылить по методике [15]. Значение HGI равно $13 + 6.93D_{74}$ (D_{74} — масса просеянной породы через сито 74 мкм). Исходя из соответствующего значения HGI, рассчитывается средний рабочий индекс Бонда нефелинового сиенита по уравнению $W_i = 511 / HGI^{0.96}$ [16, 17]. Вычисленное значение HGI нефелинового сиенита составляет 56.66, W_i — 10.60 кВт·ч/т. На следующей стадии выбираются три одномерных интервала ($-0.090 + 0.053$ мм) при соответствии $\sqrt[4]{2}$ набору сит. Удельная скорость измельчения классифицированного материала при использовании шаров из легированной стали размерами 6.35, 7.94, 9.52, 12.70 и 19.05 мм находится по формуле

$$S_i = \alpha \left(\frac{x_i}{1 \text{ мм}} \right)^\alpha Q_i,$$

где x_i — верхний размер (мм) ряда i ; $\alpha = 0.5 - 1.5$ — параметр, характеризующий материал; $Q_i = 1 / [1 + (x_i / \mu)^\lambda]^\lambda$ — корректирующий коэффициент (μ — размер частицы, при котором $Q_i = 0.5$, $\lambda \geq 0$ — показатель того, как быстро уменьшается скорость измельчения при увеличении размера частиц) [13].

Для получения функции распределения измельчения нефелинового сиенита до попадания в одномерные интервалы для пяти шаров разного размера применялся метод вычислительных программ на основе кинетической модели [13]. Образцы измельчались и анализировались с определением функции распределения:

$$B_{i,1} = \frac{\log[(1 - P_i(0)) / (1 - P_i(t))]}{\log[(1 - P_2(0)) / (1 - P_2(t))]}, \quad i > 1,$$

здесь $P_i(0)$, $P_2(0)$ — кумулятивная подситовая доля поданного материала соответственно в размерном диапазоне i и во втором размерном диапазоне, %; $P_i(t)$ — кумулятивный подпросев материала за время t в размерном ряду i . Если верхний размер обозначить через j , то уравнение приобретет следующий вид:

$$B_{i,j} = \frac{\log[(1 - P_i(0)) / (1 - P_i(t))]}{\log[(1 - P_{j+1}(0)) / (1 - P_{j+1}(t))]}, \quad i > j.$$

С помощью методики нелинейной статистической регрессии представляют сумму квадратов разницы между минимальными измеренными и рассчитанными значениями, определяют параметры γ , φ , β и анализируют изменения параметров распределения измельчения и параметров распределения частиц по размеру:

$$B_{i,j} = \varphi_j \left(\frac{x_{i-1}}{x_j} \right)^\gamma + (1 - \varphi_j) \left(\frac{x_{i-1}}{x_j} \right)^\beta, \quad 0 \leq \varphi_j \leq 1.$$

Скорость шаровой мельницы составила 75% от максимальной. Ниже приведены параметры шаровой мельницы и условия проведения испытания:

Диаметр / длина мельницы, мм	150 / 150
Объем мельницы, м ³	2.65 · 10 ⁻³
Максимальная скорость вращения мельницы, об./мин	111 – 117
Рабочая скорость вращения мельницы, об./мин	83 – 88
Материал шара	Легированная сталь
Диаметр шара, мм	6.35, 7.94, 9.52, 12.70, 19.05
Относительная плотность, кг/м ³	8.09
Частичное заполнение	0.30
Плотность измельчаемого материала, кг/м ³	2.44
Частичное заполнение	0.12
Отношение загрузки материала к шарам	1.00

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Материалы в одномерных интервалах измельчались при увеличении времени помола. Для каждого испытания построены зависимости фракции материала по наибольшему размеру частиц от времени помола (рис. 2). Участок, на котором линия уменьшается, отражает область первоочередного измельчения. Наклон линии на данном участке показывает удельную скорость измельчения, зависящую от диапазона размеров частиц материала.

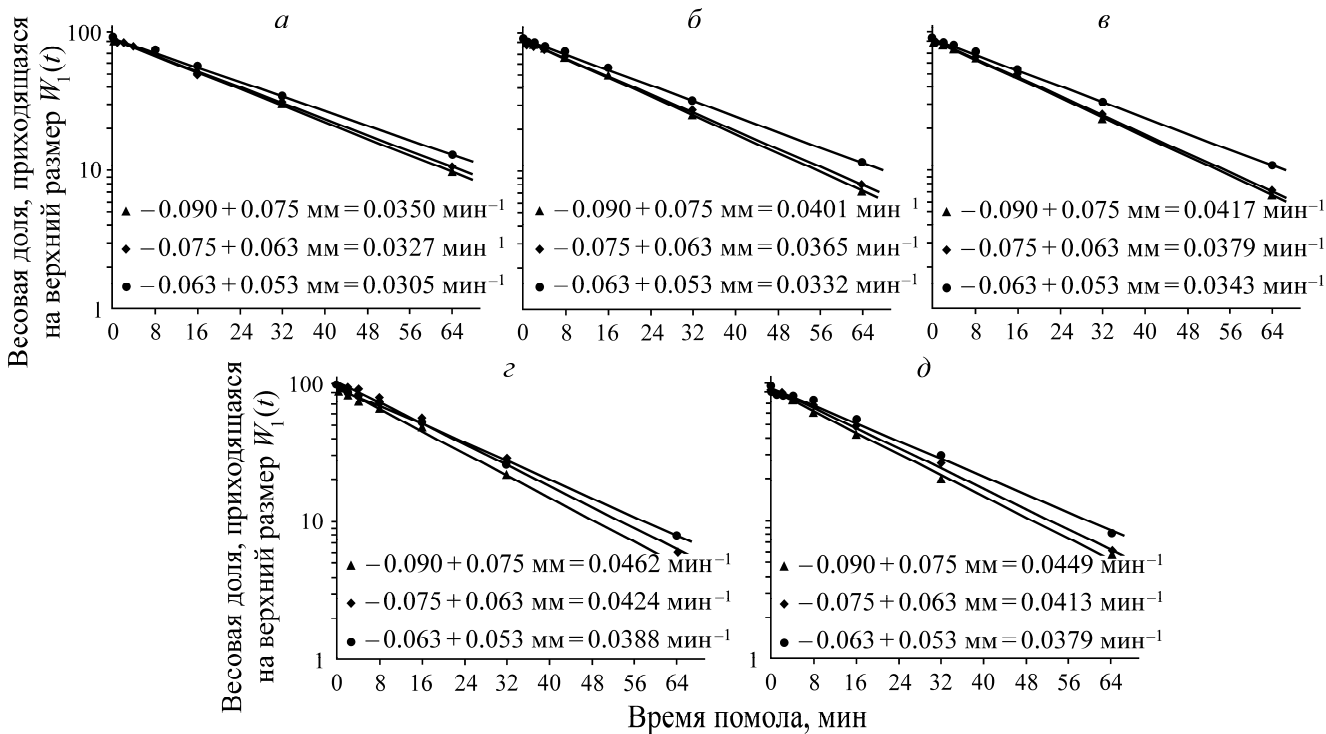


Рис. 2. Измельчаемость материала для шаров диаметром: 6.35 (а), 7.94 (б), 9.52 (в), 12.70 (г), 19.05 мм (д)

Ниже приведены удельные скорости измельчения S_i при использовании шаров разных диаметров, мин^{-1} :

Класс, мм	6.35 мм	7.94 мм	9.52 мм	12.70 мм	19.05 мм
0.090–0.075	0.0350	0.0401	0.0417	0.0462	0.0449
0.075–0.063	0.0327	0.0365	0.0379	0.0424	0.0413
0.063–0.053	0.0305	0.0332	0.0343	0.0388	0.0379

После установления удельной скорости измельчения для трех одномерных интервалов, характеризующих кинетическое поведение первоочередного разрушения, построены зависимости S_i от размерной фракции частиц. Параметры скорости измельчения по данным графикам определены как a , α , μ и Λ (рис. 3).



Рис. 3. Изменение удельной скорости измельчения при использовании шаров разного диаметра для сухого помола нефелинового сиенита ($D=0.15$ м, $J=0.30$, $U=1$)

Удельные скорости измельчения уменьшаются после достижения размера зерен 0.090 мм (рис. 3), так как большие куски слишком прочные для разрушения в данной мельнице. В [13] отмечается, что меньшие частицы прочнее ввиду наличия в больших частицах дефектов Гриффитса, количество которых сокращается при уменьшении размера частиц. Тот факт, что удельная скорость измельчения — обычная степенная функция размера, до сих пор не имеет теоретического объяснения, но эмпирически доказан. При рассмотрении размера частиц и изменений параметров распределения измельчения обнаружено, что нормализованные данные не зависят от размера шаров. Изменение распределений измельчения по размеру частиц показано на рис. 4.



Рис. 4. Кумулятивная функция распределения измельчения при использовании шаров разного диаметра

В [13] исследовалось влияние восьми шаров диапазона 19–64 мм для определения параметров B на кварцевых образцах. Выявлено, что шары с бóльшим размером создают бóльшую силу воздействия. При увеличении размера шаров γ возрастает, т. е. количество измельчаемого материала уменьшается, а значение φ увеличивается. Меньшая удельная скорость измельчения, возникающая из-за бóльших шаров, частично компенсируется образованием большей доли мелких фрагментов [13]. Для значений γ происходит обратное явление (табл. 2).

ТАБЛИЦА 2. Параметры модели для шаров разного диаметра

d , мм	a , мин ⁻¹	α	μ	λ	γ	φ_j	β
6.35	0.16	0.57	0.30	1.35	3.830	0.853	11.551
7.94	0.23	0.67	0.39	1.37	3.842	0.835	12.166
9.52	0.24	0.68	0.39	1.37	3.791	0.801	13.026
12.70	0.24	0.63	0.37	1.37	4.152	0.932	7.819
19.05	0.23	0.62	0.36	1.36	4.105	0.902	9.896

В традиционных шаровых мельницах шары больших размеров используются для измельчения крупных частиц, шары маленьких размеров — для помола мелких. В [13] установлено влияние диаметра шаров на скорость измельчения. С учетом представленного объема измельчаемого материала количество взаимодействий шара о шар за единицу времени возрастает, так как диаметр шара уменьшается, что приводит к увеличению количества шаров. Скорость измельчения частиц с меньшими размерами выше у шаров меньших диаметров. Определена удельная скорость измельчения сырьевого материала фракции 0.595–0.420 мм при использовании шаров в диапазоне 20–50 мм.

Условия испытаний различны. Выбран максимальный диаметр шаров 19 мм при соответствии $\sqrt[4]{2}$ ситовым наборам; использованы три одноразмерных интервала $-0.090 + 0.053$ мм. Количество трещин Гриффитса сократилось, и эффективность помола снизилась, так как уменьшился размер частиц. Удельная скорость измельчения уменьшается, поскольку количество энергии, передаваемой шарами малого диаметра частицам, становится недостаточным (рис. 5). Более эффективный помол происходит при использовании шаров бóльших диаметров. Выявлено, что диаметр 12.70 мм оптимален для достижения максимальных скоростей измельчения.

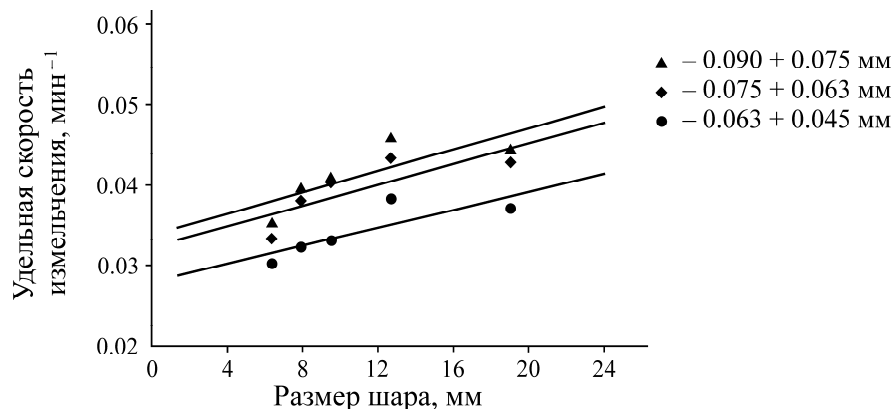


Рис. 5. Изменение удельной скорости измельчения от диаметра шара при измельчении материала разной крупности

На рис. 6 показано изменение параметров γ и φ нефелинового сиенита на участке нормального измельчения при увеличении диаметра шаров. Использование шаров с меньшим диаметром позволило получить более мелкую фракцию материала, но измеренные значения B недостаточно корректны для разработки точной численной зависимости.

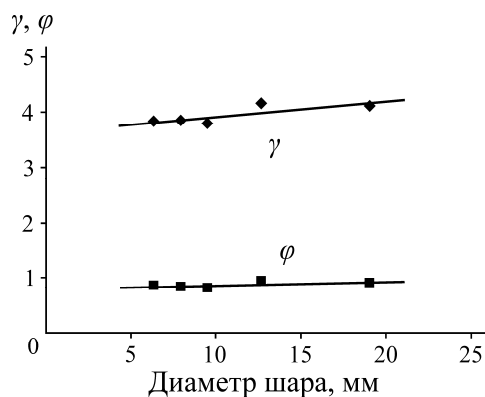


Рис. 6. Изменение параметров γ и φ при использовании шаров разного диаметра для сухого помола нефелинового сиенита ($D=0.15$ м, $J=0.30$, $U=1$)

ВЫВОДЫ

Определен индекс измельчаемости Хардгрова ($HGI = 56.66$), на основе которого рассчитано значение W_i (10.60 кВт·ч/т). Исследовано влияние размера шаров на кинетические параметры помола нефелинового сиенита в шаровой мельнице. Диаметр шара подчиняется закону первоочередного измельчения с постоянно нормализованными первичными распределениями измельчения. Установлено, что данные являются нормализованными и не зависят от размера. Малый размер шаров не может влиять на разрушение материала. Механизм истирания шара более эффективен, чем механизм соударения для мелкофракционных материалов, поэтому выход большего количества мелкого материала с большей площадью поверхности достигается шарами с меньшим диаметром. Количества энергии, передаваемой от шара к частице, недостаточно, и более эффективное измельчение обеспечивается шарами с большим диаметром. Наиболее эффективное измельчение достигнуто при диаметре шара 12.70 мм.

Параметры измельчения сырьевого материала из разных регионов не совпадают из-за различного минерального состава. На обогатительных комбинатах рекомендуется измерять кинетические параметры измельчения сырьевых материалов с целью сокращения количества энергии, затрачиваемой на измельчение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Haner S. and Demir M. Nepheline syenite: A review, J. Geol. Eng., 2018, Vol. 42, No. 1. — P. 107–120.
2. Feldspar report, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Accessed December 15, 2019. www.maden.org.tr/resimler/ekler/8c09c2ec26db837_ek.pdf.
3. Revnivitsev V. I., Kropanev S. I., and Peskov V. V. Methods of increasing the $K_2O:Na_2O$ ratio in feldspars, Glass and Ceramics, 1964, Vol. 21, No. 1. — P. 32–36.
4. Liddell K. S. Machines for fine milling to improve the recovery of gold from calcines and pyrite, Proc. of the Int. Conf. on Gold, Johannesburg, 1986. — P. 405–417.

5. **Agrafiotis C. and Tsoutsos T.** Energy saving technologies in the European ceramic sector: A systematic review, *Appl. Therm. Eng.*, 2001, Vol. 21. — P. 1231–1249.
6. **Durgut E., Pala Ç. Y., Kayacı K., Altıntaş A., Yıldırım Y., and Ergin H.** Development of a semi-wet process for ceramic wall tile granule production, *J. Ceram. Proc. Res.*, 2015, Vol. 16. — P. 596–600.
7. **Plaksin I. N., Uteush E. V., and Uteush Z. V.** Some problems in process control in enrichment plants, *Soviet Min. Sci.*, 1965, Vol. 1, No. 4. — P. 405–408.
8. **Bakker J.** Energy use of fine grinding in mineral processing, *Metall. Trans. E*, 2014, Vol. 1E. — P. 8–19.
9. **Coghill W. H. and Devaney F. D.** Ball mill grinding, 1937. Accessed December 15, 2019. play.google.com/books/reader?id=k4MbYBy8674C&hl=tr&pg=GBS.PP1.
10. **Bond F. C.** Grinding ball size selection, *Min. Eng.*, 1958. — P. 592–595.
11. **Austin L. G., Shoji K., and Luckie P. T.** The effect of ball size on mill performance, *Powder Technol.*, 1976, Vol. 14. — P. 71–79.
12. **Yusupov T. S., Kirillova E. A., and Denisov G. A.** Dressing of quartz-feldspar ores on the basis of selective grinding and mechanical activation, *J. Min. Sci.*, 2003, Vol. 39, No. 2. — P. 174–177.
13. **Austin L. G., Klimpel R. R., and Luckie P. T.** Process engineering of size reduction: ball milling, New Jersey, American Institute of Min. Metal. and Petrol. Eng. Inc., 1984.
14. **Austin L. G., Bagga R., and Çelik M.** Breakage properties of some materials in a laboratory ball mill, *Powder Technol.*, 1981, Vol. 28. — P. 235–241.
15. **Standard test** method for Grindability of coal by ball-race hardgrove-machine, Philadelphia, ASTM Int., 1993.
16. **Aplan F. F.** The hardgrove test for determining the Grindability of coal, lecture note in MN PR 301, Elements of Miner. Proc., Pennsylvania State University, State College, Pennsylvania, 1996.
17. **Aplan F. F., Austin L. G., Bonner C. M., and Bhatia V. K.** A study of Grindability tests, G0111786, U. S., Bureau of Mines, U.S.A, 1974.

Поступила в редакцию 16/XII 2019

После доработки 16/VIII 2020

Принята к публикации 11/IX 2020