

УДК 621.926

Математическая модель процесса измельчения угля в пневмотранспортной измельчительной установке

Г.И. Нечаев, С.В. Ленич, В.А. Турушин

Сведения об авторах

Нечаев Григорий Иванович — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой транспортных систем Луганского государственного университета им. В. Даля

Ленич Сергей Васильевич — старший преподаватель кафедры транспортных систем Луганского государственного университета им. В. Даля, e-mail: mouselenich@yandex.ru

Турушин Владимир Александрович — кандидат технических наук, доцент кафедры транспортных систем Луганского государственного университета им. В. Даля

В последнее время наметилась тенденция создания устройств для измельчения материалов путем высокоскоростного удара. Этот способ используется в струйных и пневматических мельницах, применяемых в системах пылеприготовления тепловых электростанций. Приведены варианты конструктивного исполнения разработанных пневмотранспортных измельчительных установок, позволяющих совмещать процессы измельчения и пневмотранспортирования сыпучих материалов. Принцип действия подобных устройств заключается в разгоне частиц потоком воздуха и последующем ударе их об отбойные элементы, установленные в коленах пневмотранспортного трубопровода. Степень измельчения определяется скоростью потока и количеством колен. Проведенные исследования показали полную работоспособность предложенных устройств, значительное снижение энергоемкости процесса измельчения, достаточную производительность при необходимой тонкости помола. Целью теоретических исследований являлось выявление закономерностей измельчения угля при ударе частиц об отбойные элементы, установленные в транспортном трубопроводе. Разработана математическая модель, устанавливающая зависимость прироста поверхности частиц угля при ударе о жесткое препятствие от основных факторов: крупности и скорости движения частицы в момент удара, угла атаки и физико-механических свойств угля. Влияние дополнительных факторов, обусловленных движением частиц в потоке воздуха и их дисперсностью, на прирост удельной поверхности учитывалось коэффициентом использования работы разрушения. Полученные результаты позволяют оценить влияние основных конструктивных и технологических параметров пневмотранспортных измельчительных установок на величину прироста удельной поверхности, характеризующую дисперсность измельчаемого материала.

Ключевые слова: антрацит, измельчение, пылеприготовление, мельница, удельная поверхность.

The mathematical model of the coal grinding process in a pneumatic transport mill

G.I. Nechayev, S.V. Lenich, V.A. Turushin

Information about authors

Nechaev Grigoriy I. — Dr.Sci. (Techn.), professor, head of transport systems dept., Lugansk state university named V. Dal'

Lenich Sergey V. — senior lecturer of transport systems dept., Lugansk state university named V. Dal', e-mail: mouselenich@yandex.ru

Turushin Vladimir A. — Ph.D. (Techn.), assistant professor of transport systems dept., Lugansk state university named V. Dal'

Recently, a tendency toward constructing machines for grinding materials by high-speed impact has emerged. This method is applied in the jet and pneumatic mills used in coal powder processing systems at thermal power plants. The article presents design versions of the developed pneumatic transport mills that make it possible to combine grinding and pneumatic transportation of friable materials. The operating principle of such devices is based on accelerating the particles by air stream, which are then collided against the baffles installed in the pneumatic transport pipeline elbows. The grain grinding degree is determined by the stream velocity and the number of pipe elbows. The study results have demonstrated full workability of the proposed devices, a significant decrease in the grinding process energy intensity, and sufficient throughput capacity at the necessary grinding fineness. The aim of theoretical investigations was to reveal coal grinding regularities during the collision of particles against the baffle elements installed in the transport pipeline. A mathematical model has been developed, which establishes the dependence between the increase of coal particle surface area at the impact against a hard obstacle and the main influencing factors: the particle size and the motion velocity at the moment of impact, the incidence angle, and the physical and mechanical properties of coal. The influence of additional factors caused by the motion of particles in the air stream and their

size distribution on the increase of specific surface area was taken into account by the destruction work coefficient. The obtained results make it possible to estimate the influence of basic design and technological parameters of pneumatic transport mills on the increase of specific surface area, which characterizes the size distribution of the grinded material.

Key words: anthracite, grinding, coal powder processing, mill, specific surface area.

Введение

Измельчение сыпучих материалов в промышленном производстве (полезных ископаемых, цемента, минеральных удобрений и др.) является одним из наиболее затратных процессов. Так, на тепловых электростанциях, работающих на твердом топливе, на измельчение угля затрачивается до 2,5% всей вырабатываемой электроэнергии. Кроме того, при измельчении материалов с помощью наиболее распространенных в настоящее время шаровых мельниц, где измельчение осуществляется раздавливанием и истиранием при качении и падении шаров, происходит интенсивный износ самих шаров и внутренней поверхности барабана. Содержание продуктов износа достигает одного килограмма на тонну перерабатываемой продукции, что вынуждает применять для изготовления шаров и футеровки внутренней поверхности барабана дорогостоящих износостойких материалов, к тому же, в ряде случаев загрязняется и снижается качество измельчаемого материала.

В последнее время наметилась тенденция создания измельчительных устройств, основанных на способе измельчения материалов высокоскоростным ударом. Этот способ используется в струйных и пневматических мельницах. Однако сами мельницы не нашли широкого промышленного применения. Основными причинами является сравнительно низкая производительность и отсутствие научно обоснованных методов расчета основных технических характеристик этих устройств.

Одним из направлений совершенствования технологии пылеприготовления является использование эффекта измельчения материалов при пневмотранспортировании. Данный способ измельчения может быть реализован путем разгона частиц потоком воздуха и удара их о размольные плиты, установленные в коленах пневмотранспортного трубопровода. Основному износу будут подвергаться размольные плиты, которые ввиду своих небольших размеров и простоте конструкции могут быть изготовлены из высокопрочных абразивостойких материалов.

Конструкции пневмотранспортных измельчительных установок. Одним из устройств, реализующих этот метод, является зигзагообразный трубопровод с отбойными плитами в коленах (рис. 1). Устройство защищено Патентом Украины № 44274 [1]. Предлагаемое устройство конструктивно чрезвычайно просто и может быть установлено в линейную часть трубопроводов, транспортирующих уголь.

Более компактным и, на наш взгляд, более эффективным является предлагаемый авторами вертикальный измельчительный змеевик, функционирующий как самостоятельный измельчитель без установки в линейную часть трубопровода (рис. 2). Устройство защищено Патентом Украины № 101529 [2].

Степень измельчения (фракционный состав частиц) регулируется скоростью потока и количеством колен. Предварительные экспериментальные исследования по измельчению угля [3, 4] показали достаточную эффективность предложенного способа измельчения и возможность получения готовой пыли с остатком на

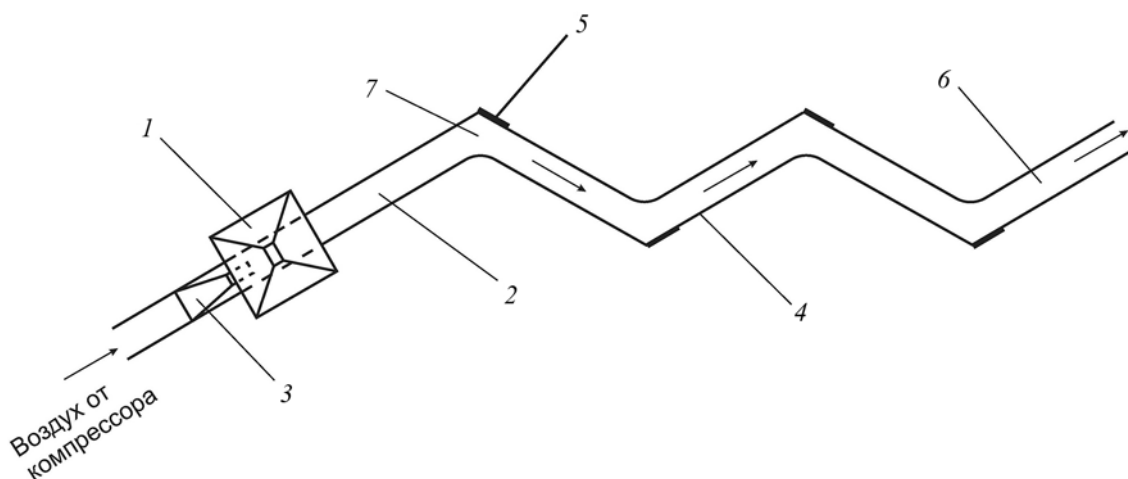


Рис. 1. Пневмотранспортная измельчительная установка в виде зигзагообразного трубопровода (вид сверху):

1 — бункер; 2 — разгонная труба; 3 — сопло; 4 — измельчительный трубопровод; 5 — отбойная плита; 6 — выводная труба; 7 — колено трубопровода

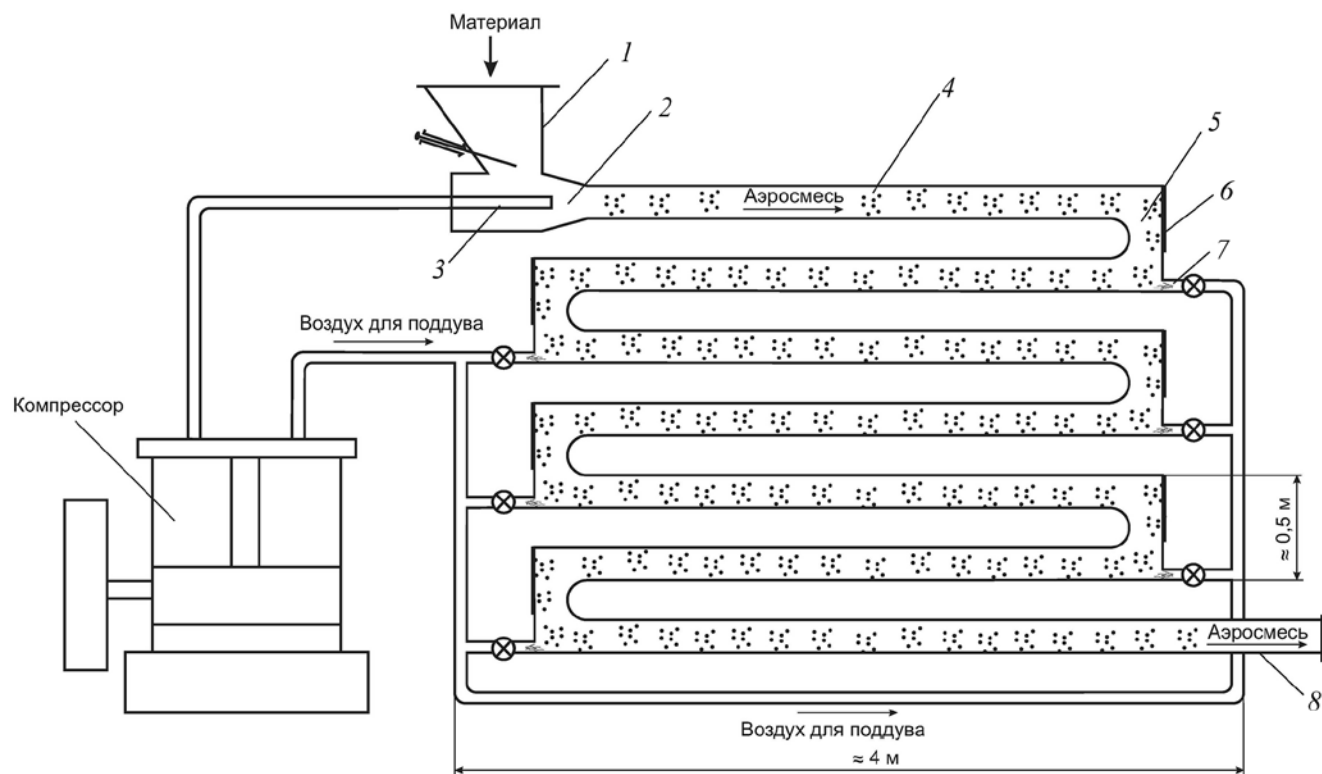


Рис. 2. Пневмотранспортная измельчительная установка в виде вертикального змеевика (общий вид):

1 — бункер; 2 — эжектор; 3 — сопло; 4 — разгонная труба; 5 — П-образное колено; 6 — отбойная плита; 7 — сопло для поддува воздуха; 8 — выводная труба

сигте $R_{90} = 8\text{--}9\%$. Однако технические характеристики таких устройств могут быть определены только в результате исследования влияния действующих факторов на процесс измельчения.

Материалы и результаты исследования

Процесс измельчения угля в пневмотранспортной измельчительной установке представляет собой совокупность элементарных актов ударного разрушения множества одиночных частиц. Поэтому, при теоретических исследованиях работы пневмотранспортной измельчительной установки важной задачей является определение закономерностей измельчения одиночной частицы свободным ударом о жесткое препятствие.

При ударном измельчении твердых и хрупких горных пород, к которым относится и уголь, после снятия нагрузки отсутствует остаточная деформация [5]. Поэтому уголь можно рассматривать как материал, приближающийся по своим свойствам к абсолютно упругим телам, и при его измельчении должна учитываться работа упругих деформаций.

Академиком П.А. Ребиндером предложен обобщенный закон измельчения [6]:

$$A = A_y + A_s,$$

где A — работа, затрачиваемая на измельчение, Дж; A_y — работа упругих деформаций, Дж; A_s — работа, затрачиваемая на образование новой поверхности, Дж.

Согласно теории упругости работа упругих деформаций тела объемом v равна [5]:

$$A_y = \sigma_p^2 v / 2E, \quad (1)$$

где σ_p — предельное напряжение упругих деформаций (предел прочности материала), Н/м^2 ; v — объем деформируемого тела, м^3 ; E — модуль Юнга, Н/м^2 .

Если телу сообщить энергию A , превышающую предельную работу упругих деформаций A_y , то оно разрушится с образованием новой поверхности ΔS , величина которой пропорциональна избытку энергии, сообщенной телу [6]:

$$A_s = A - A_y = k_r \Delta S, \quad (2)$$

где k_r — эмпирический коэффициент пропорциональности, представляющий собой удельную работу на создание единицы новой поверхности, Дж/м^2 ; ΔS — прирост поверхности при разрушении тела, м^2 .

Коэффициент k_r зависит от типа материала и способа измельчения.

С учетом (1), (2) работа измельчения равна:

$$A = \frac{\sigma_p^2 v}{2E} + k_r \Delta S.$$

Установленная зависимость позволяет рассматривать процесс измельчения как единое целое и в то же время анализировать отдельно упругую деформацию

и собственно измельчение — образование новой поверхности [6].

Из теории удара известно, что работа, затрачиваемая на деформацию тела выглядит как:

$$A = E_1 - E_2,$$

где E_1, E_2 — кинетические энергии ударяющегося тела до и после удара,

$$E_1 = \frac{mV_q^2}{2}; E_2 = \frac{mV_p^2}{2},$$

где m — масса ударяющегося тела, кг; V_q, V_p — скорости тела в момент удара и после него, м/с.

Тогда

$$A = \frac{mV_q^2}{2} - \frac{mV_p^2}{2} = \frac{m}{2}(V_q^2 - V_p^2). \quad (3)$$

При ударе о неподвижную поверхность скорость тела V_p определяется из выражения [7]:

$$V_p = V_q \sqrt{\sin^2 \alpha + k_b^2 \cos^2 \alpha}, \quad (4)$$

где k_b — коэффициент восстановления при ударе, зависящий от формы и физико-механических свойств сталкивающихся тел, $0 < k_b < 1$; α — угол между нормалью к неподвижной поверхности и направлением удара.

Подставив (4) в (3), получим работу, затрачиваемую на деформацию и разрушение материала:

$$A = \frac{mV_q^2}{2}(1 - \sin^2 \alpha - k_b^2 \cos^2 \alpha).$$

Работа на образование новых поверхностей A_s , т.е. на разрушение частицы материала, определится как:

$$A_s = \frac{mV_q^2}{2}(1 - \sin^2 \alpha - k_b^2 \cos^2 \alpha) - \frac{\sigma_p^2 \nu}{2E}.$$

Следовательно,

$$k_r \Delta S = \frac{\nu \rho_q V_q^2}{2}(1 - \sin^2 \alpha - k_b^2 \cos^2 \alpha) - \frac{\sigma_p^2 \nu}{2E},$$

где ρ_q — плотность материала, кг/м³,

$$k_r \Delta S = \frac{\nu}{2} \left[\rho_q V_q^2 (1 - \sin^2 \alpha - k_b^2 \cos^2 \alpha) - \frac{\sigma_p^2}{E} \right]. \quad (5)$$

Объем частицы ν определяется ее формой, зависящей от способа измельчения и физико-механических свойств материала. Для ударного измельчения, согласно [8, 9], с применением дезинтеграторов, струйных и пневматических мельниц характерно получение материала узкой гранулометрии, с частицами кубообразной (щебневидной) формы с острыми углами и сильно развитой конфигурацией.

Таким образом, полагая, что тело имеет кубообразную форму, из выражения (5) определим прирост поверхности при разрушении частицы размером d :

$$\Delta S = \frac{d^3}{2k_r} \left[\rho_q V_q^2 (1 - \sin^2 \alpha - k_b^2 \cos^2 \alpha) - \frac{\sigma_p^2}{E} \right]. \quad (6)$$

Как видно из (6), с уменьшением размера частиц уменьшается и прирост поверхности ΔS , что связано с уменьшением кинетической энергии частиц. Таким образом, с увеличением дисперсности материала, необходимо увеличивать скорость разрушения, что согласуется с исследованиями [5, 10, 11]. С увеличением угла α эффективность измельчения и прирост поверхности ΔS снижаются.

На рисунках 3, 4 приведены графики зависимости прироста поверхности ΔS от размера частицы d , скорости V_q в момент удара о жесткое препятствие и угла атаки α для антрацита с характеристиками: $\sigma_p = 25$ МПа, $E = 7000$ МПа, $\rho_q = 1700$ кг/м³.

Значения эмпирических коэффициентов k_r и k_b взяты на основании экспериментальных исследований [5, 12—14]: $k_r = 45$ Дж/м², $k_b = 0,21$.

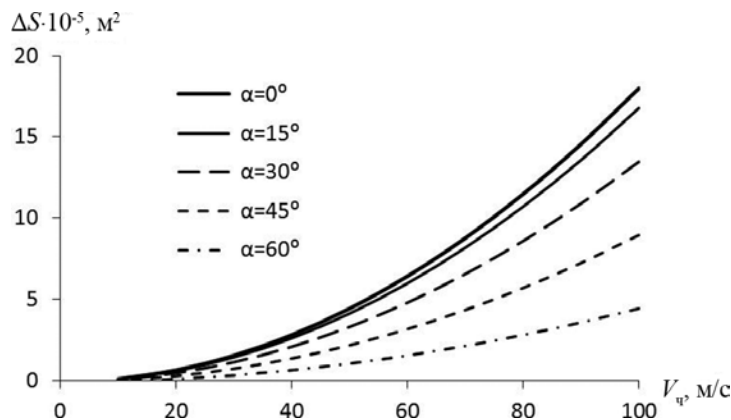
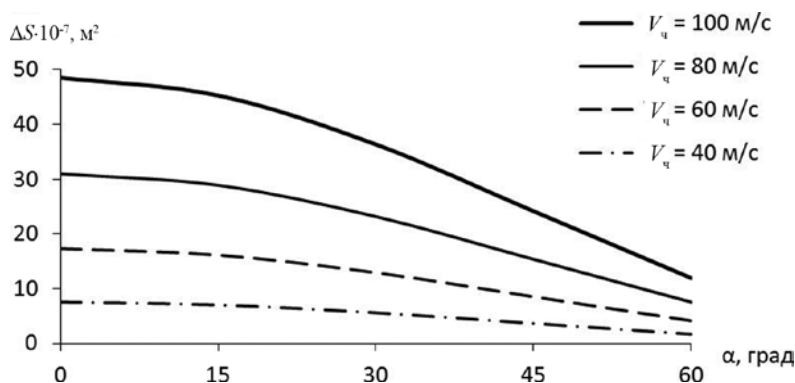
Таким образом, до значения скорости $V_q \approx 8$ м/с разрушение частиц антрацита не происходит при любой первоначальной крупности d . В данном случае вся энергия, в момент удара, преобразуется в работу упругих деформаций частицы без ее разрушения. При увеличении скорости V_q частиц — прирост поверхности ΔS возрастает. Причем, с уменьшением угла атаки α , это возрастание проявляется в большей степени.

Угол атаки α (рис. 4) оказывает значительное влияние на процесс разрушения частиц антрацита. При отклонении направления удара от прямого ($\alpha = 0^\circ$) — прирост поверхности ΔS уменьшается. Наиболее интенсивное разрушение происходит при угле атаки $\alpha = 0—15^\circ$.

Измельчение угля осуществляется путем нескольких последовательных ударов частиц о размольные плиты, установленные в коленах трубопровода. После каждого удара угольная пыль — полидисперсна, т.е. состоит из частиц различного размера. Каждая частица измельчается согласно (6). Поделив суммарный прирост поверхности на массу всех частиц можно определить общий прирост удельной поверхности ΔS_m (м²/кг). При этом характеристикой дисперсности частиц до удара будет не их размер d , а общая удельная поверхность S_m .

Поэтому при измельчении множества частиц в потоке пневмотранспорта предложено определять прирост удельной поверхности ΔS_m (отношение прироста поверхности ΔS к массе измельчаемого материала) угольной пыли после прохождения колена трубопровода.

Влияние дополнительных факторов, обусловленных движением частиц в потоке воздуха и их дис-

Рис. 3. График зависимости $\Delta S = f(V_{\text{ч}})$ при $d = 1$ ммРис. 4. График зависимости $\Delta S = f(\alpha)$ при $d = 0,3$ мм

персностью S_m , на прирост удельной поверхности ΔS_m учитывается коэффициентом $k_{\text{см}}$, который может быть определен в результате экспериментальных исследований.

С учетом (6) имеем

$$\Delta S_m = \frac{k_{\text{см}}}{2k_r} \left[V_{\text{см}}^2 \cos^2 \alpha (1 - k_b^2) - \frac{\sigma_p^2}{E\rho_{\text{ч}}} \right],$$

где $k_{\text{см}}$ — эмпирический коэффициент использования работы разрушения на образование новой поверхности при измельчении частиц угля в потоке воздуха; $V_{\text{см}}$ — скорость движения аэросмеси, м/с.

Коэффициент $k_{\text{см}}$ зависит от конструктивных и технологических параметров пневмотранспортной измельчительной установки, а также от удельной поверхности частиц угольной пыли перед ударом S_m , он определяется экспериментальными исследованиями.

Выводы

Разработана математическая модель, устанавливающая зависимость прироста поверхности частиц угля при ударе о жесткое препятствие от основных факторов: крупности и скорости движения частицы в момент удара, угла атаки и физико-механических свойств угля.

Полученная зависимость прироста удельной поверхности при измельчении частиц угля, движущихся в потоке воздуха, от основных факторов может быть использована при определении основных конструктивных и технологических параметров пневмотранспортных измельчительных установок.

Литература

1. Пат. 44274 Украина. Подрібновач / В.О. Турушин, Г.І. Нечасв, С.В. Ленич // Бюл. 2009. № 18.
2. Пат. 101529 Украина. Газоструминний подрібновач / В.О. Турушин, С.В. Ленич // Бюл. 2011. № 7.
3. Ленич С.В., Турушин В.А. Анализ результатов экспериментальных исследований измельчения антрацита в пневмотранспортной измельчающей установке // Вісник СНУ ім. В. Даля. 2012. № 6 (177) частина 2. С. 281—288.
4. Ленич С.В. Результати досліджень процесу подрібновальний антрациту в пневмотранспортній подрібновальній установці // Вісник СНУ ім. В. Даля. 2014. № 4 (211) частина 1. С. 277—280.
5. Сиденко П.М. Измельчение в химической промышленности. М.: Химия, 1977.
6. Акунов В.И. Струйные мельницы. Элементы теории и расчета. М.: Машиностроение, 1967.
7. Яблонский А.А. Курс теоретической механики. В 2 ч. Ч. 2. Динамика. М.: Высшая школа, 1966.

8. **Липилин А.Б., Коренюгина Н.В., Векслер М.В.** Ударная активация или наиболее энергопродуктивные способы измельчения сырьевых ресурсов // Экспозиция. Специализированное издание: Бетоны и сухие смеси. 2007. № 1Б (48/Б). С. 22—25.
9. **Векслер М.В., Коренюгина Н.В., Липилин А.Б.** Активация портландцемента — новые горизонты // Строительная логистика. МП «Техприбор» [Электрон. ресурс]. <http://www.tpribor.ru/aktnovgor2.html> (дата обращения 25.11.2015).
10. **Ходаков Г.С.** Тонкое измельчение строительных материалов. М.: Строительство, 1972.
11. **Молчанов В.И., Юсупов Т.С.** Физические и химические свойства тонкодиспергированных минералов. М.: Недра, 1981.
12. **Robinson G., Sinnott M., ClearyCan P.** Cross-belt sample cutters be trusted? // Presentation to Sampling Conf. Perth, 2008.
13. **Молчанов В.И., Селезнева О.Г., Жирнов Е.Н.** Активация минералов при измельчении. М.: Недра, 1988.
14. **Ганкевич В.Ф., Горобец Л.Ж., Плохотнюк Е.И., Шуляк И.А.** Энергетический подход к оценке свойств горных пород [Электрон. ресурс]. <http://zombie999.boom.ru/book02/8.htm> (дата обращения 12.04.2016).

Статья поступила в редакцию 13.06.2016