МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДО-СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ С ПОЗИЦИИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И КАЧЕСТВА КОНЕЧНОГО ПРОДУКТА

ЖИРОВ Д. К.

Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения РАН,
426067, г. Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34

АННОТАЦИЯ. Представлен обзор существующих способов исследования образцов различных материалов для оценки их способности противостоять разрушению, расхода затрачиваемой на измельчение энергии. Для упругих материалов с высокими демпфирующими свойствами, целесообразно использовать способ разрушения резанием, при попытке измельчать их ударным способом частицы будут восстанавливать свое первоначальное состояние после деформации и практически вся затрачиваемая энергия пойдет не на разрушение, а на энергию деформации. Для определения оптимальных режимов разрушения частиц твердо-сыпучих материалов была разработана методика, позволяющая определять требуемую скорость вылета частиц с разгонных лопаток центробежно-ударной мельницы и оптимальное число ударов. Были разработаны и изготовлены две установки: ударная установка в виде трубы с наковальней и малогабаритная центробежно-ударная мельница с возможностью изменения числа ступеней измельчения, позволяющая менять сита после каждой ступени измельчения и изменять движение массопотока на следующую ступень измельчения или в готовый продукт. Сравнение полученных данных гранулометрического состава конечного продукта после измельчения на ударной установке и экспериментальной мельнице показало их хорошую согласуемость. 1 вариант позволяет в кратчайшие сроки определить оптимальный режим для разрушения частиц материалов с учетом требований к фракционному составу конечного продукта, энергоэффективности. 2 вариант требует больше времени, однако в отличие от первой также позволяет исследовать влияние промежуточного отбора готового продукта после каждой ступени измельчения на качество конечного продукта и энергоэффективность.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: удар, гранулометрический состав, частица, многоступенчатая мельница, параметр измельчаемости, методика измельчаемости.

ВВЕДЕНИЕ

Измельчение – процесс разрушения хрупких твердых частиц на более мелкие фрагменты, вызванный распространением множественных трещин. Такое разрушение может быть вызвано квазистатическим нагружением (сжатие или растяжение) либо волновой интерференцией при динамическом нагружении.

На рис. 1 представлены способы исследования образцов для оценки их способности противостоять разрушению. В зависимости от механических характеристик измельчаемого образца выбирается способ разрушения. Так для упругих материалов с высокими демпфирующими свойствами, целесообразно использовать способ разрушения резанием, при попытке измельчать их ударным способом (свободный или стесненный удар) частицы будут восстанавливать свое первоначальное состояние после деформации и практически вся затрачиваемая энергия пойдет не на разрушение, а на энергию деформации. Одиночный удар может быть выполнен с помощью испытаний при свободном падении образца [2 – 5] или путем свободных ударов образца по мишени-чаще всего для этого используют пневматическое оружие (рис. 1). Существуют модели ружей, позволяющих регулировать скорость вылета образцов в довольно широком диапазоне. При испытаниях на двойной удар образец разрушается между двух твердых поверхностей. Чаще всего к этому типу относится испытание на падение веса ударника, при котором частица покоится на поверхности. Скорости деформации при данном методе испытаний, как правило, значительно ниже, чем при указанном выше тесте. Это связано с значительным превосходством массы ударника перед массой образца и соответственно меньшим значением необходимой для исследований скорости падения ударника в сравнении с свободным ударом образца (испытания свободного

удара). На рис. 1, б представлен известный способ исследования образцов на измельчаемость, предусматривающий нагружение образца одним или двумя движущимися молотами. Он известен под названием «маятник». В обоих тестах количество энергии, которое доступно частице в момент удара, известно из классической механики. Используя необходимую аппаратуру, возможно определить долю энергии, приходящуюся на упругие деформации и на непосредственно измельчение (рис. 2).

Испытания на сжатие проводятся с использованием одноосных прессов или с помощью жестко закрепленной вальцовой мельницы (рис. 1, slow compression). Приведенные выше методы испытаний определения измельчаемости образцов за исключением испытаний на высокоскоростное баллистическое воздействие проводятся с такими скоростями образца, ударника или молотков, что продолжительности контакта достаточно, чтобы напряжение распространилось и уравнилось по всему объему исследуемой частицы. Эти методы испытаний образцов называются квазистатическими [6 – 9].

Рис. 1. Различные способы тестирования образцов:
а) – одиночный удар, двойной удар, сжатие; б) – маятник) [10]

Большинство промышленных, сельскохозяйственных или бытовых процессов в настоящее время предполагают измельчение материалов в той или иной форме. Отрасли, в которых процесс разрушения имеет особо важную роль – это горнодобывающая промышленность, строительство, металлургия, фармакология, пищевая, комбикормовая промышленности. В гражданском строительстве измельчение применяется при дроблении горной массы в процессе добычи, при взрывных работах с горными породами при прокладке туннелей, при получении бетонных смесей и т.д.

Детальное понимание процесса разрушения имеет первостепенное значение для многих дисциплин, включая геологию, прикладную механику горных пород, почвоведение. Понимание процесса разрушения ударом имеет фундаментальное значение. Лабораторные испытания образцов могут быть надежным способом изучения процесса разрушения.

В зависимости от механических характеристик измельчаемого образца выбирается способ разрушения [3, 6, 10]. В работе представлена методика для определения оптимальных режимов разрушения частиц твердо-сыпучих материалов, позволяющая определять требуемую скорость вылета частиц с разгонных лопаток центробежно-ударной мельницы и

оптимальное число ударов. Были разработаны и изготовлены две установки: ударная установка в виде трубы с наковальней (рис. 2) и малогабаритная центробежно-ударная мельница [13] с возможностью изменения числа ступеней измельчения с одной до трех, позволяющая менять сита после каждой ступени измельчения и изменять движение массопотока на следующую ступень измельчения или в готовый продукт в зависимости от требований к фракционному составу конечного продукта.

Рис. 2. Ударная установка для исследования измельчения твердо-сыпучих материалов

Суть разработанной методики заключается в следующем. Необходимо определить энергию $E_{\text{пот}}$, требуемую для полного разрушения образца (10 и более кусков). Для этого определяется требуемая высота сброса груза массой M . Далее проводятся исследования по измельчению образца с различных высот и различных числом раз при условии не превышении суммарной энергии $E_{\text{пот}}$ [1].

На рис. 3 показано сравнение вычисленной скорости падения ударника в момент его удара по образцу и измеренной при экспериментальных исследованиях, произведенных на фотодиодной системе. Система состоит из пары фотодиодов, фиксирующих пики на сигнале осциллографа в момент прохождения груза-ударника в зоне между фотодиодом и источником света. Поскольку высота сброса ударника известна, зная время прохождения участка, определяем скорость движения ударника с высокой точностью. Сравнение показало хорошее соответствие значений скорости для эксперимента и теории для исследовательского теста по определению измельчаемости при свободном сбросе ударника на образец. Это подтверждает, что описываемая методика расчета может с успехом применяться для оценки энергозатрат при измельчении с достаточной точностью (погрешность не более 5 %) [6, 10].

Для исследования показателя измельчаемости методом сброса груза-ударника используют грузы-ударники и наковальни различной геометрии: сфера-сфера, сфера-плоскость, плоскость-плоскость. В ряде случаев исследователи используют ударники и наковальни с определенной кривизной поверхности. [11, 12].

Наибольшую популярность среди исследователей завоевал метод исследования при использовании плоской поверхности ударника и плоской наковальни. Влияние геометрии груза-ударника и наковальни при постоянной энергии удара было представлено в работе [10] (см. рис. 4, б).

На рис. 4 показано, что при низкой энергии удара геометрия груза-ударника и наковальни незначительно влияют на гранулометрический состав полученной после исследования массы частиц. Это происходит по той причине, что большая часть кинетической энергии груза-ударника расходуется на первичное разрушение исходного образца и на последующее разрушение фрагментов остается лишь незначительное количество энергии.

Рис. 3. Сравнение вычисленной скорости падения ударника в момент его удара по образцу и измеренной при экспериментальных исследованиях, произведенных на фотодиодной системе [10]

При более высоком воздействии на образец (рис. 4), гранулометрический состав фрагментов после измельчения значительно отличается в зависимости от геометрии ударника и наковальни.

Рис. 4. Влияние геометрии ударника и отбойной деки на разрушение частиц апатита 2,8–2,0 мм (диаметр шарика: 25,4 мм) при энергии удара: а) – 874 Дж и б) – 6488 Дж [10]

Практически во всем диапазоне размеров фрагментов (0,04... 2 мм) комбинация плоский ударник – плоская наковальня имеют преимущество и более эффективно разрушают образцы. Вероятнее всего, это связано с тем, что при высокой энергии удара после начала удара по образцу и его первичного разрушения остается значительное количество энергии для дальнейшего нагружения уже разрушенного образца. Полученные новые фрагменты рассыпаются в стороны от основной массы образца и в случае, когда ударник и наковальня имеют сферическую форму вероятность их разрушения значительно снижается, так как они

выходят из зоны измельчения. Вариант, когда ударник имеет сферическую поверхность, а наковальня – плоскую, показывает средние значения распределения.

В случае использования сферического ударника и сферической наковальни процент выхода фракции менее 0,03 мм выше варианта плоскость-плоскость. Это можно связать с более высокой концентрацией энергии при данном способе разрушения.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что для измельчения образца 2 – фасоль до десяти и более кусков с одного удара требуется сбросить груз 40 г с высоты 400 мм. Диапазон проведения исследований по измельчению образца выбран в промежутке от $h/10 = 40$ мм до $h = 400$ мм с шагом в $h/10$. В таблице представлены соотношения высоты сброса ударника, эквивалентной скорости и энергия. На рис. 5 представлены изображения образцов после разрушения.

Таблица

Высота сброса ударника при измельчении образца 2

Обозначение	Высота, мм	Потенциальная энергия $E_{п}, \text{Н}$	Эквивалентная скорость $v_{\text{экв}}, \text{м/с}$
h	400	0,1568	39,6
h/2	200	0,0784	28,0
h/3	133	0,052136	22,8
h/4	100	0,0392	19,8
h/5	80	0,03136	17,7
h/6	67	0,026264	16,2
h/7	57	0,022344	14,95
h/8	50	0,0196	14,0
h/9	44	0,017248	13,13
h/10	40	0,01568	12,5

Рис. 5. Фото образца-2 фасоль после ударов в экспериментальной установке

На рис. 6 представлено гранулометрическое распределение частиц конечного продукта образца 2, полученного при условии суммарно затрачиваемой энергии на разрушение не более 0,156 Н (таблица, рис. 5). Если сравнить полученные результаты по разрушению фасоли с исследованиями по разрушению гороха (образец 1) [1], где оптимальным числом ударов было 3 или 4, то в случае образца 2 эффективнее с позиции энергозатрат и качества конечного продукта использовать разрушение за 1 – 2 удара. Использование способа разрушения с большим числом ударов приведет лишь к излишним энергозатратам, износу рабочих органов измельчающих установок и снижению выравненности гранулометрического состава конечного продукта. Проведенные исследования подтвердили необходимость проведения предварительных экспериментов по измельчению для определения оптимальных режимов работы измельчающей установки для конкретного материала, даже в рамках различных партий.

Рис. 6. Гранулометрическое распределение образца 2 при измельчении на ударной установке

Для исследований показателя измельчаемости материалов и определения оптимального режима разрушения была изготовлена экспериментальная установка центробежно-ударного типа, позволяющая быстро менять количество ступеней измельчения в пределах от 1 до 3 и сита после каждой ступени. Установка позволяет изменять условие перехода на следующую стадию измельчения или в готовый продукт, а также число ударов полученных частицами исследуемого материала. Привод мельницы оснащен частотным преобразователем и позволяет изменять частоту вращения ротора мельницы. В ходе экспериментов максимальная скорость вращения ротора мельницы была выбрана на уровне 100 Гц (6000 оборотов в минуту). На рис. 7 – 9 частота 0 Гц соответствует исходному образцу.

Для определения оптимальных режимов разрушения различных видов зерновых культур были проведены исследования по измельчению в разработанной установке с одной, двумя и тремя ступенями разрушения [13 – 17]. На рис. 7 – 9 представлены графики гранулометрического распределения частиц конечного продукта одного из исследуемых образцов – образец 3 (рожь).

Рис. 7. Гранулометрическое распределение образца 3 после 1 камеры измельчения

Рис. 8. Гранулометрическое распределение образца 3 после 2 камер измельчения

Рис. 9. Гранулометрическое распределение образца 3 после 3 камер измельчения

Сравнение полученных данных гранулометрического состава конечного продукта после измельчения на ударной установке и экспериментальной мельнице с возможностью изменения числа ступеней измельчения и смены сит после каждой ступени измельчения показало их хорошую согласуемость. Первый вариант позволяет в кратчайшие сроки определить оптимальный режим для разрушения частиц материалов с учетом требований к фракционному составу конечного продукта, энергоэффективности. Второй вариант с использованием экспериментальной малогабаритной мельницы требует больше времени, однако в отличие от первой также позволяет исследовать влияние промежуточного отбора готового продукта после каждой ступени измельчения на качество конечного продукта и энергоэффективность.

ВЫВОДЫ

Для определения оптимальных режимов разрушения частиц твердо-сыпучих материалов была разработана методика, позволяющая определять требуемую скорость вылета частиц с разгонных лопаток центробежно-ударной мельницы и оптимальное число ударов. Были разработаны и изготовлены две установки: ударная установка в виде трубы с наковальней и малогабаритная центробежно-ударная мельница с возможностью изменения числа ступеней измельчения с одной до трех, позволяющая менять сита после каждой ступени измельчения и изменять движение массопотока на следующую ступень измельчения или в готовый продукт в зависимости от требований к фракционному составу конечного продукта.

Сравнение полученных данных гранулометрического состава конечного продукта после измельчения на ударной установке и экспериментальной мельнице с возможностью изменения числа ступеней измельчения и смены сит после каждой ступени измельчения показало их хорошую согласуемость. Первый вариант позволяет в кратчайшие сроки определить оптимальный режим для разрушения частиц материалов с учетом требований к фракционному составу конечного продукта, энергоэффективности. Второй вариант с использованием экспериментальной малогабаритной мельницы требует больше времени, однако в отличие от первой также позволяет исследовать влияние промежуточного отбора готового продукта после каждой ступени измельчения на качество конечного продукта и энергоэффективность. Как показали экспериментальные исследования ошибка в выборе числа ударов при разрушении может повысить энергозатраты до 15 – 30 % и увеличить износ рабочих органов мельницы без улучшений выравниваемости гранулометрического состава конечного продукта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жиров Д. К., Терентьев Е. И. Методика предварительной оценки размолоспособности материалов, параметров конструкции и режимов работы центробежной мельницы // Химическая физика и мезоскопия. 2017. Т. 19, № 1. С. 31-38.
2. Nied R. CHAPTER 5 Rotor Impact Mills // Handbook of Powder Technology, 2007, vol. 12, pp. 229-249.
3. Гийо Р. Глава 1 Способы измельчения // В кн.: Проблема измельчения материалов и ее развитие / пер. с фр. Г.Г. Мунц, под ред. Г.С. Холакова. М.: Стройиздат, 1964. С. 8-33. URL: <https://ua.b-ok.cc/ireader/2763602> (дата обращения 07.02.2019).
4. Tavares L. M., Diniz R. R. Analysis of self-breakage for modelling media competence in autogenous mills // VI SHMMT XVIII ENTMM, 2001, vol. 1, pp. 47-52.
5. Ballantyne G. R., Bonfils B., Powell M. S. Evolution of impact breakage characterisation: Re-defining t-family relationship // International Journal of Mineral Processing, 2017, vol. 168, pp. 126-135.
6. Chau K. T., Wu S. Chapter 2 Impact Breakage of Single Particles: Double Impact Test // Handbook of Powder Technology, 2007, vol. 12, pp. 69-85.
7. Remenyi K. The theory of grindability and the comminution of binary mixtures. Budapest: Akademiai Kiado, 1974. 144 p.
8. Fuerstenau D. W., Abouzeid A.-Z. M. The energy efficiency of ball milling in comminution // International Journal of Mineral Processing, 2002, vol. 67, iss. 1-4, pp. 161-185.
9. Пападакис М. Применение характеристик размалываемости материалов для изучения работы шаровых мельниц // Доклады Европейского совещания по измельчению. М.: Стройиздат, 1966. С. 307-309.

URL: <https://www.chem21.info/page/107068048039233127014075251085022199199071072089/> (дата обращения 07.02.2019).

10. Tavares L. M. Chapter 1 Breakage of Single Particles: Quasi-Static // *Handbook of Powder Technology*, 2007, vol. 12, pp. 3-68.

11. Протодяконов М. М. Определение крепости угля на шахтах // *Уголь*. 1950. № 9. С. 20-24.

12. Барон Л. И., Логунцов Б. М., Позин Е. З. Определение свойства горных пород : Справочник. М.: Госгортехиздат, 1962. 332 с.

13. Жиров Д. К. Многоступенчатая центробежно-ударная мельница // Патент РФ № 153992, 2015.

14. Липанов А. М., Жиров Д. К. Математическое моделирование динамики движения частиц в установках по измельчению центробежно-ударного типа. Часть 1 Математическая модель // *Химическая физика и мезоскопия*. 2014. Т. 16, № 1. С. 82-87.

15. Денисов В. А., Жиров Д. К. Разработка программы САР линии по безотходной переработке многокомпонентных материалов на примере алюминиевого шлака // *Химическая физика и мезоскопия*. 2011. Т. 13, № 2. С. 285-289.

16. Жиров Д. К. Автоматизированная система управления процессом механоактивации многокомпонентных материалов по гранулометрическому распределению частиц в потоке // *Химическая физика и мезоскопия*. 2011. Т. 13, № 1. С. 117-120.

17. Липанов А. М., Денисов В. А., Братухина Ю. В., Жиров Д. К. Энергоэффективность в технологиях переработки минерального сырья // *Химическая физика и мезоскопия*. 2010. Т. 12, № 2. С. 188-191.

THE METHODOLOGY FOR STUDYING THE PROCESS OF DESTRUCTION OF SOLID BULK MATERIALS FROM THE STANDPOINT OF ENERGY EFFICIENCY AND QUALITY OF THE FINAL PRODUCT

Zhirov D. K.

Udmurt Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Science, Izhevsk, Russia

SUMMARY. The paper presents an overview of existing methods for studying samples of different materials to assess their ability to resist destruction (index of shredding), the consumption of energy spent on grinding. Depending on the mechanical characteristics of the crushed sample, a method of destruction is chosen. So for elastic materials with high damping properties, it is advisable to use a method of destruction by cutting, when trying to grind them in a shock way (free or constrained impact), the particles will restore their original state after deformation and almost all the energy spent will not go to destruction, but to the energy of deformation. To determine the optimal modes of destruction of particles of solid-bulk materials, a technique was developed that allows determining the required rate of departure of particles from the upper blades of the centrifugal impact mill and the optimal number of impacts. Two plants were designed and manufactured: a pipe-and-anvil impact mill and a small-sized centrifugal impact mill with the ability to change the number of grinding stages from one to three, allowing you to change the sieve after each stage of grinding and change the movement of the mass flow to the next stage of grinding or to the finished product, depending on the requirements for the fractional composition of the final product. Comparison of the obtained data of the granulometric composition of the final product after grinding on a drum set and an experimental mill showed their good consistency. The first option allows in the shortest possible time to determine the optimal mode for the destruction of particles of materials, taking into account the requirements for the fractional composition of the final product, energy efficiency. The second option using an experimental small-sized mill requires more time, but in contrast to the first also allows you to explore the impact of intermediate selection of the finished product after each stage of grinding on the quality of the final product and energy efficiency.

KEYWORDS: shock, grading, particle, multi-step mill, grindability index, grindability method.

REFERENCES

1. Zhirov D. K., Terent'ev E. I. Metodika predvaritel'noy otsenki razmolosposobnosti materialov, parametrov konstruktiv i rezhimov raboty tsentrobezhnoy mel'nitsy [The preliminary evaluation methodology of materials dissolvency, parameters of design and operating modes of centrifugal mill]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical Physics and Mesoscopy], 2017, vol. 19, no. 1, pp. 31-48.

2. Nied R. CHAPTER 5 Rotor Impact Mills. *Handbook of Powder Technology*, 2007, vol. 12, pp. 229-249. [https://doi.org/10.1016/S0167-3785\(07\)12008-X](https://doi.org/10.1016/S0167-3785(07)12008-X)

3. Giyo R. Glava 1 Sposoby izmel'cheniya [Chapter 1 Grinding Methods]. V kn.: *Problema izmel'cheniya materialov i ee razvitiye* [In book: The problem of grinding materials and its development]. Per. s fr. G.G. Munts, pod red. G.S. Kholakova. Moscow: Stroyizdat Publ., 1964, pp. 8-33. URL: <https://ua.b-ok.cc/reader/2763602> (accessed February 7, 2019).

4. Tavares L. M., Diniz R. R. Analysis of self-breakage for modelling media competence in autogenous mills. *VI SHMT I XVIII ENTMM*, 2001, vol. 1, pp. 47-52.

5. Ballantyne G. R., Bonfils B., Powell M. S. Evolution of impact breakage characterisation: Re-defining t-family relationship. *International Journal of Mineral Processing*, 2017, vol. 168, pp. 126-135. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2017.10.001>

6. Chau K. T., Wu S. Chapter 2 Impact Breakage of Single Particles: Double Impact Test. *Handbook of Powder Technology*, 2007, vol. 12, pp. 69-85. [https://doi.org/10.1016/S0167-3785\(07\)12005-4](https://doi.org/10.1016/S0167-3785(07)12005-4)
7. Remenyi K. *The theory of grindability and the comminution of binary mixtures*. Budapest: Akademiai Kiado, 1974. 144 p.
8. Fuerstenau D. W., Abouzeid A.-Z. M. The energy efficiency of ball milling in comminution. *International Journal of Mineral Processing*, 2002, vol. 67, iss. 1-4, pp. 161-185. [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(02\)00039-X](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(02)00039-X)
9. Papadakis M. Primenenie kharakteristik razmalyvaemosti materialov dlya izucheniya raboty sharovykh mel'nits [Application grindability characteristics of materials for the study of ball mill]. *Doklady Evropeyskogo soveshchaniya po izmel'cheniyu* [Reports of the European Shredding Meeting]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1966, pp. 307-309. URL: <https://www.chem21.info/page/107068048039233127014075251085022199199071072089/> (accessed February 7, 2019).
10. Tavares L. M. Chapter 1 Breakage of Single Particles: Quasi-Static. *Handbook of Powder Technology*, 2007, vol. 12, pp. 3-68. [https://doi.org/10.1016/S0167-3785\(07\)12004-2](https://doi.org/10.1016/S0167-3785(07)12004-2)
11. Protod'yakov M. M. Opredelenie kreposti uglya na shakhtakh [Determination of the fortress on the coal mines]. *Ugol'* [Coal], 1950, no. 9, pp. 20-24.
12. Baron L. I., Loguntsov B. M., Pozin E. Z. *Opredelenie svoystva gornyykh porod* [Determination of rock properties]. Spravochnik. Moscow: Gosgortekhzdat Publ., 1962. 332 p.
13. Zhiron D. K. Mnogostupenchataya tsentrobezhno-udarnaya mel'nitsa [Multistage centrifugal impact mill]. *Patent RU 153992*, 2015.
14. Lipanov A. M., Zhiron D. K. Matematicheskoe modelirovanie dinamiki dvizheniya chastits v ustanovkakh po izmel'cheniyu tsentrobezhno-udarnogo tipa. Chast' 1. Matematicheskaya model' [Modeling particles dynamic motion on centrifugal shock mill blades. Part 1. Mathematical model]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical Physics and Mesoscopies], 2014, vol. 16, no. 1, pp. 82-87.
15. Denisov V. A., Zhiron D. K. Razrabotka programmy SAR linii po bezothodnoj pererabotke mnogokomponentnykh materialov na primere aluminievogo shlaka [Development of a CAP program line for waste-free processing of multicomponent materials on the example of aluminum slag]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical Physics and Mesoscopies], 2011, vol. 13, no. 2, pp. 285-289.
16. Zhiron D. K. Avtomatizirovannaya sistema upravleniya processom mehanoaktivatsii mnogokomponentnykh materialov po granulometricheskomu raspredeleniyu chastic v potoke [Automatic control system for the process of mechanical activation of multicomponent materials by the particle size distribution of particles in the stream]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical Physics and Mesoscopies], 2011, vol. 13, no. 1, pp. 117-120.
17. Lipanov A. M., Denisov V. A., Bratuhina Y. V. Jenergoeffektivnost' v tehnologiyah pererabotki mineral'nogo syr'ya [Energy Efficiency in Mineral Processing Technologies]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical Physics and Mesoscopies], 2010, vol. 12, no. 2, pp. 188-191.

Жиров Дмитрий Константинович, кандидат технических наук, научный сотрудник,
Институт механики УдмФИЦ УрО РАН, e-mail: zhiron_dmitriy@mail.ru