

## ОЦЕНКА СКОРОСТИ ТОНКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ РУД МЕЛЬНИЦАМИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

Проведен анализ кинетики измельчения руд в шаровой, стержневой и струйной мельницах. Исследования процесса измельчения в мельницах разного типа показали возможность описания его на основе вычисления математического ожидания и нормального отклонения гранулометрического состава материала. Установлено, что для тонкого измельчения руд кривые уравнений кинетики имеют вид квадратичных парабол, коэффициенты которых зависят от свойств материала и вида мельницы.

Исследования скорости измельчения материалов основывались на анализе изменений гранулометрического состава измельчаемого материала, т. е. кинетике измельчения. Определены скорости измельчения узких классов полиметаллической руды, бедной медно-никелевой руды в барабанных мельницах, шлака и кварцевого песка в струйной мельнице. Показано, что скорость измельчения для фракций крупных частиц имеет убывающий характер, для фракций средних и мелких частиц – знакопеременный характер. Предложено использовать стержневую, шаровую и струйную мельницы последовательно на различных стадиях для эффективного измельчения материалов в замкнутом цикле.

Проведено аналіз кінетики подрібнення руд у кульковому, стрижневому і струйному млинах. Дослідження процесу подрібнення в млинах різного типу показало можливість опису їх на основі обчислення математичного очікування та нормального відхилення гранулометричного складу матеріалу. Встановлено, що для тонкого подрібнення руд криві рівнянь кінетики мають вигляд квадратичних парабол, коефіцієнти яких залежать від властивостей матеріалу й виду млина.

Дослідження швидкості подрібнення матеріалу базується на аналізі зміни гранулометричного складу матеріалу, що подрібнюється, тобто на кінетиці подрібнення. Визначено швидкості здрибнювання вузьких класів поліметалевої руди, бідної мідно-нікелевої руди в барабаних млинах, шлаків і кварцевого піску в струйному млині. Показано, що швидкість подрібнення для фракцій великих за розміром часток має убутний характер, для фракцій середніх і дрібних часток – знакозмінний характер. Запропоновано використати стрижневий, кульовий й струйний млини послідовно на різних стадіях для ефективного здрибнювання матеріалів у замкнутому циклі.

A kinetic analysis of ore grinding in ball, rod and jet mills is carried out. Studies of grinding in different mills demonstrated the possibility of describing this process using calculations of the expectation and a normal deviation of the granulometric composition of material. It is found that for fine ore grinding the curves of the kinetics equations form square-law parabolas, the factors of which depend on material properties and the mill type.

Studies in rates of material grinding have been based on the analysis of variations in the granulometric composition of a crushed material structure, i.e. grinding kinetics. The grinding rates of limited classes of polymetallic ore, poor copper-nickel ore in tumbling mills, slag and quartz sand in a jet mill are determined. It is shown that the grinding rate for fractions of large particles is decreasing in its effect and is sign-variable in behavior for fractions of average and fine particles. It has been suggested that rod, ball and jet mills be used in series at various stages for effective grinding materials in a closed cycle.

**Введение.** Анализ скорости измельчения различных материалов является актуальной проблемой, возникающей во многих отраслях промышленности. Это связано с главной задачей процесса измельчения – неперезмельчить более требуемого класса крупности, с одной стороны, и с необходимостью снижения энергоемкости производства, с другой стороны. Для измельчения полезных ископаемых и других материалов используют различные виды мельниц, отличающиеся типом воздействия на материал. В процессе измельчения разрушение осуществляют под действием механических, тепловых или электрических сил, направленных на преодоление внутренних сил сцепления частиц твердого тела. На практике измельчение с целью уменьшения размеров кусков до заданной крупности происходит под действием внешних механических усилий, создаваемых рабочими органами измельчительного агрегата, или при соударении частиц в струях энергоносителя.

Для тонкого измельчения руд чаще всего используются барабанные мельницы (шаровые, стержневые), относящиеся к первому способу разруше-

ния, и струйные мельницы. В последнем способе измельчения источником энергии, обеспечивающим внутримельничные процессы (разрушение частиц, пневмотранспорт, разделение по крупности, возврат циркулирующей нагрузки), являются взаимодействующие с частицами газовые струи, организующие их движение и обуславливающие не только высокодинамичный механизм раскрытия минералов, но и изменение структуры (механоактивацию) измельченного порошка. Однако этот способ дезинтеграции минерального сырья отличается большой энергоемкостью при получении тонких порошков, что вызывает необходимость установления и поддержания наиболее эффективного режима измельчения.

**Постановка задачи.** При тонком измельчении полезных ископаемых разные по крупности фракции материала ведут себя по-разному. На первом этапе относительно крупный материал измельчается легче и требует меньше энергии. Но при измельчении частиц меньшего размера, т. е. при увеличении суммарной поверхности мелкодисперсной фазы, требуется больше энергии для измельчения частиц, наблюдается термодинамическое неравновесие двухфазной системы, и сильнее проявляются силы коагуляции. Причем, для разных материалов, обладающих разными прочностными свойствами, химическим и морфологическим составом, исходным гранулометрическим составом, кинетика измельчения проявляется по-разному. Необходимо изучить особенности тонкого измельчения минералов с позиций поведения частиц разной крупности в процессе измельчения.

**Цель** данной работы состоит в исследовании скорости измельчения материалов разных свойств в шаровых, стержневых и струйных мельницах, используемых для тонкого измельчения материалов.

Исследования скорости измельчения материалов основывались на анализе изменений гранулометрического состава измельчаемого материала, т. е. кинетике измельчения. Исследования процесса измельчения в мельницах разного типа показали возможность описания его на основе оценивания математического ожидания  $Mx$  и стандартного отклонения гранулометрического состава материала  $\sigma$  вида:

$$\begin{cases} Mx = a_1 t^2 - a_2 t + a_3 \\ \sigma = b_1 t^2 - b_2 t + b_3 \end{cases}, \quad (1)$$

где  $t$  – время измельчения.

При этом коэффициенты  $a_i, b_i$  зависят от материала и вида мельницы. В частности, для струйного измельчения шлака, кинетика измельчения которого показана в таблице 1, уравнения имеют вид:

$$\begin{aligned} Mx &= 0,023t^2 - 0,26t + 0,88 \text{ (коэффициент регрессии } R = 0,985), \\ \sigma &= 0,008t^2 - 0,13t + 0,7 \text{ ( } R = 0,999). \end{aligned} \quad (2)$$

В таблице представлены результаты выхода продукта (остатки на сите) в процентах по классам крупности  $\pm \alpha$ , причем  $+\alpha$  обозначает наличие мате-

риала на сите размером  $\alpha$ , т. е. крупность продукта более  $\alpha$ , соответственно  $-\alpha$  обозначает наличие материала крупностью менее  $\alpha$ .

Таблица 1

Кинетика измельчения шлака (по остатку на сите  $K$ ,%)  
в струйной лабораторной мельнице

$t$ , мин	Классы крупности, мм; выход %										
	+1,6	+1	+0,63	+0,4	+0,3	+0,2	+0,16	+0,1	+0,06	+0,05	-0,05
0	9,62	16,8	17,58	12,97	10,26	6,44	6,82	4,76	5,2	4,98	4,5
1	8,33	18,2	15,15	13,72	7,32	10,1	5,08	8,86	4,38	7,09	1,8
2	3,23	9,44	9,59	9,42	5,43	8,63	6,16	21,82	9,29	12,59	4,4
3	1,07	7,0	8,10	8,56	5,03	8,43	6,62	21,03	11,7	18,39	4,1
4	0,47	4,36	5,95	6,27	3,91	6,69	5,23	22,67	18,53	23,53	2,4
5	0,00	3,49	5,36	4,99	2,99	6,23	3,89	21,31	25,42	23,08	3,2

Рассматривались также результаты измельчения полиметаллической руды в шаровой мельнице. Полиметаллическая руда месторождения Кутесай 2 является трудноизмельчаемой, комплексной, образованной несколькими типами оруднения: редкоземельного, циркониевого, ториевого и полиметаллического [1]. Продукт измельчения полиметаллической руды в шаровой мельнице был довольно грубым с преобладанием частиц крупнее 2 мм (см. таблицу 2). В связи с этим кривая отклонения гранулометрического состава имеет вид возрастающей функции с выпуклостью вверх (см. рис. 1а, кривая 2).

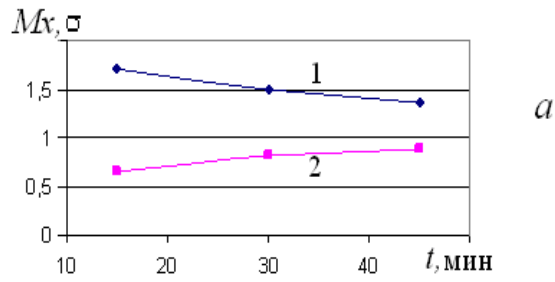
Таблица 2

Ситовый анализ измельчения полиметаллических руд  
в шаровой мельнице [1]

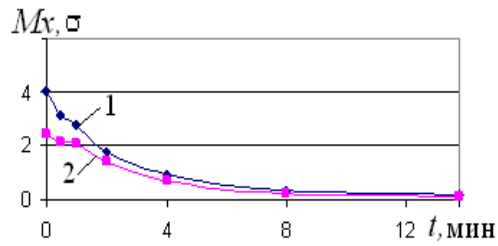
$t$ , мин	Классы крупности, мм; выход %					
	+2,0	+1,4	+0,8	+0,3	+0,074	+0,0415
15	81,3	2,2	3	4,9	5,7	2,9
30	71,5	1,35	2,43	5	14,45	5,27
45	66	0,52	0,98	4,4	15,33	12,77

Анализировалась кинетика измельчения бедной медно-никелевой руды в шаровой и стержневой мельницах [2], исходный гранулометрический состав и кинетика измельчения которой представлен в таблицах 3 и 4, соответственно. На рис. 1 б показаны кривые кинетики измельчения в шаровой мельнице.

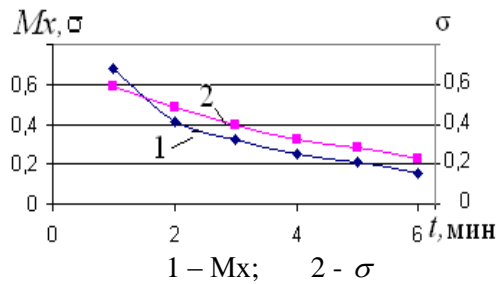
Установлено, что для тонкого измельчения руд кривые уравнений кинетики имеют вид квадратичных парабол (1), коэффициенты которых зависят от свойств материала и вида мельницы (см. рис. 1).



a



б



в

1 – Mx; 2 – σ

Рис. 1 – Графики уравнений кинетики грубого (а) и тонкого (б) измельчения в шаровой мельнице и тонкого измельчения в струйной мельнице (в)

Таблица 3

Кинетика шарового измельчения бедной медно-никелевой руды в шаровой мельнице

Класс, мм	Время измельчения, мин									
	0	0,5	1	2	4	8	16	32	64	
+10	0,66	0,41	0,37	0,36	0,3	0,21	0,19	0,15	0,12	
-10+8	2,34	1,69	1,14	0,97	0,93	0,76	0,4	0,26	0,06	
-8+5	30,66	20,5	20,09	16,52	12,67	11,47	2,46	2,17	0,74	
-5+3	31,74	31,98	27,76	29,09	23,71	18,78	2,81	1,33	0,81	
-3+2	10,1	14,64	17,95	15,9	15,31	15,55	4,98	1,23	0,72	
-2+1,6	5,61	6,37	5,96	6,21	7,42	7,22	6,28	1,71	0,51	
-1,6+1	5,5	6,49	6,58	7,09	7,9	8,15	9,19	4,57	1,13	
-1+0,63	3,85	4,79	5,24	5,56	6,44	6,65	8,26	7,91	2,66	
-0,63+0,4	2,51	3,34	3,88	4,51	5,32	5,78	15	11,34	4,87	
-0,4+0,2	3,06	3,91	4,26	5,24	6,94	8,04	8,58	18,19	17,82	
-0,2+0,16	0,55	0,72	0,82	1,04	1,4	1,94	4,16	5,22	5,99	
-0,16+0,1	1,25	1,66	1,84	2,28	3,39	4,21	10,12	12,28	13,98	
0,1+0,071	0,6	0,81	0,95	1,21	1,73	2,22	5,49	6,85	7,58	
-0,071										
+0,045	0,63	0,96	1,04	1,39	2,14	2,7	6,93	8,77	9,53	
-0,045	0,94	1,73	2,12	2,63	4,4	6,32	15,15	18,02	33,48	
Всего										
-0,071	1,57	2,69	3,16	4,02	6,54	9,02	22,08	26,79	43,01	

Кинетика измельчения бедной медно-никелевой руды  
в стержневой мельнице

Класс, мм	Время измельчения, мин							
	0	0,5	1	2	4	8	16	32
+10	0,66	0,26	0,17	0	0	0	0	0
-10+8	2,34	0,77	0,69	0,11	0	0	0	0
-8+5	30,66	16,63	12,68	2,57	0	0	0	0
-5+3	31,74	31,49	25,45	12,69	0,54	0	0	0
-3+2	10,1	16	18,3	22,29	5,85	0	0	0
-2+1,6	5,61	7,05	8,25	12,21	12,51	0	0	0
-1,6+1	5,5	7,73	9,38	13,34	21,14	1,27	0	0
-1+0,63	3,85	5,71	6,9	10,23	16,95	4,84	0	0
-0,63+0,4	2,51	3,68	4,82	6,84	11,58	28,09	1,02	0
-0,4+0,2	3,06	4,18	5,32	7,6	12,24	27,52	29,16	1,12
-0,2+0,16	0,55	0,81	1,04	1,5	2,47	4,65	9,79	3,68
-0,16+0,1	1,25	1,71	2,2	3,14	5,15	10,19	19,51	21,2
0,1+0,071	0,6	0,88	1,14	1,56	2,64	5,03	9,11	14,74
-0,071 +0,045	0,63	0,92	1,23	1,83	2,99	5,61	10,06	16,44
-0,045	0,94	2,18	2,43	4,09	5,94	12,8	21,35	42,82
Всего								
-0,071	1,57	3,1	3,66	5,92	8,94	18,41	31,41	59,26

Анализ кинетики измельчения одинакового сырья в разных мельницах (шаровой и стержневой) показал зависимость кинетики и скорости измельчения от вида мельницы, т. е. от способа разрушения. Скорость измельчения узких фракций определялась по одной и той же методике:

$$v_{ni} = \frac{\Delta\gamma_i}{\Delta t} = (\gamma_i - \gamma_{i+1}) / \Delta t, \quad (2)$$

где  $v_{ni}$  – скорость измельчения анализируемой фракции,  $\gamma_i, \gamma_{i+1}$  – содержание фракции (%) на данном и последующем шаге измельчения,  $\Delta t$  – длительность шага измельчения.

На рис. 2 и 3 показаны скорости измельчения в струйной, стержневой и шаровой мельнице фракций крупных (а), средних (б) и мелких (в) по размеру частиц.

В струйной мельнице скорость измельчения для крупных фракций имеет убывающий характер, эти фракции разрушаются на начальном этапе измельчения и выбывают из процесса. Для средних и мелких фракций кривые скорости имеют знакопеременный характер, что можно объяснить работой струйной мельницы в замкнутом цикле с периодическим добавлением недоизмельченного материала в зону помола.

При стержневом и шаровом измельчении скорости измельчения крупных фракций имеют также убывающий характер, однако в стержневой мельнице крупные частицы первых двух рассматриваемых классов исчезают интенсивнее (около четырех минут). В шаровой мельнице этот процесс растягивается до 12 мин. В остальных классах скорости измельчения имеют отрицательное значение, что обозначает накопление массы фракций в начальный период.

На следующем этапе в стержневой мельнице средние по крупности классы начинают интенсивно измельчаться и со второй минуты скорость убывания фракций  $(-2,0 + 1,6 \text{ мм}) \dots (-1,0 + 0,63)$  приобретает знакопеременный характер, увеличиваясь до  $7 \text{ %/мин}$  на четвертой минуте, а затем убывает до полного исчезновения фракций. В тоже время при шаровом измельчении процесс убывания средних фракций происходит медленнее, имея также знакопеременный характер. Так, до восьмой минуты упомянутые выше средние фракции обладают отрицательной скоростью измельчения, только после 10-12 минут скорости становятся положительными и медленно растут.

Для мелких фракций в стержневой мельнице характерна отрицательная скорость измельчения, т. е. для них преобладает процесс накопления вплоть до момента исчезновения средних классов (12 – 16 мин). Потом частицы мелких классов начинают измельчаться, за исключением двух последних фракций (частицы размером  $+ 0,01$ ), которые сохраняют накопительный характер, преобладающий над измельчением.

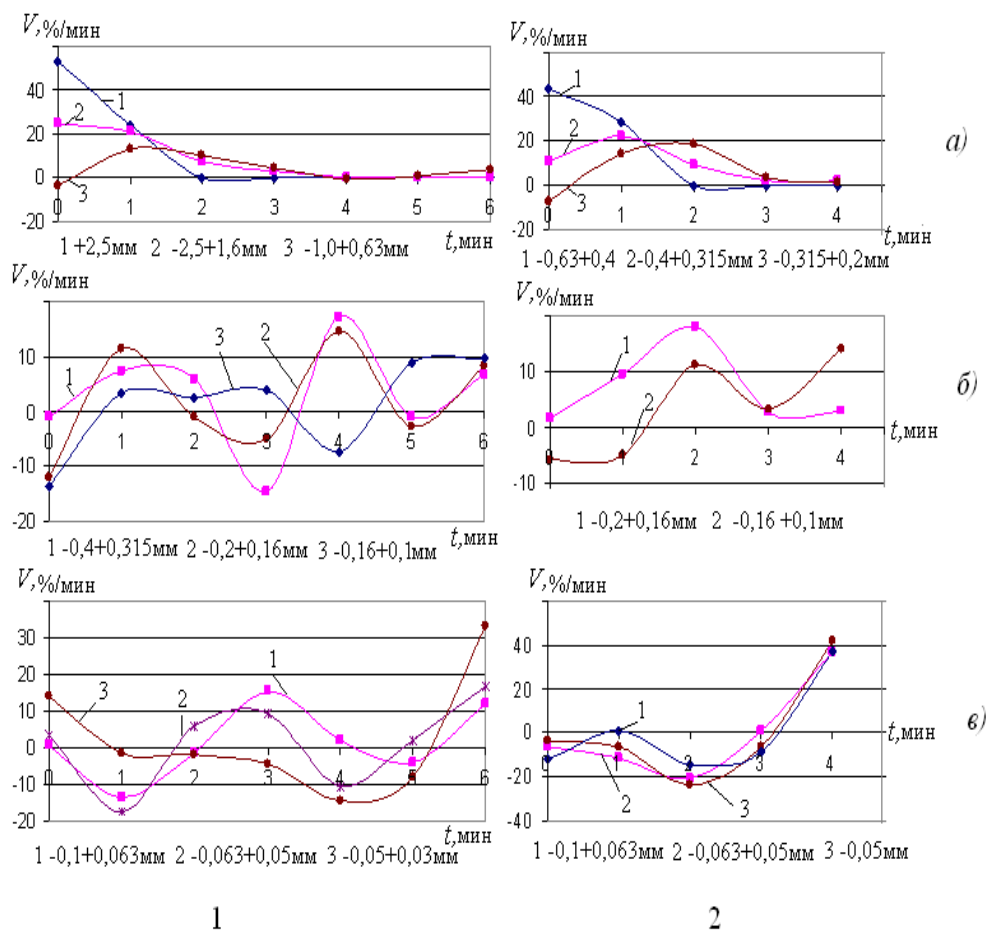


Рис. 2 – Скорости измельчения крупных (а), средних (б) и мелких (в) узких фракций шлака (1) и кварцевого песка (2) в струйной мельнице

Для шарового измельчения на среднем и заключительном этапе измельчения характерно преобладание накопительного процесса в средних и мелких фракциях. Имея знакопеременные кривые скоростей измельчения, ча-

стицы фракций до  $-0,1$  имеют отрицательную скорость измельчения до 16 минут. Процесс измельчения происходит только за счет остатков крупных фракций и средней фракции ( $+2,0 - 1,6$ ). Только во второй половине процесса измельчения, т. е. после 64 минуты (см. табл. 3) начинают измельчаться средние классы, при этом мелкие фракции так и не включаются в измельчение.

Таким образом, анализ скорости измельчения узких фракций бедной медно-никелевой руды в стержневой и шаровой мельницах показал преимущества стержневой мельницы для получения продукта дисперсностью менее 2,0 мм. Однако измельчение в стержневой мельнице более энергоемкое, поэтому возможно комбинировать использование двух мельниц: вначале стержневую для получения 90 % продукта крупностью менее 2,0 мм, потом для получения продукта менее 0,071 мм подключать шаровую мельницу [2]. Учитывая возможности струйной мельницы, можно рассмотреть включение в замкнутый цикл измельчения [3] струйной мельницы на третьем этапе для измельчения продукта менее 0,63 мм.

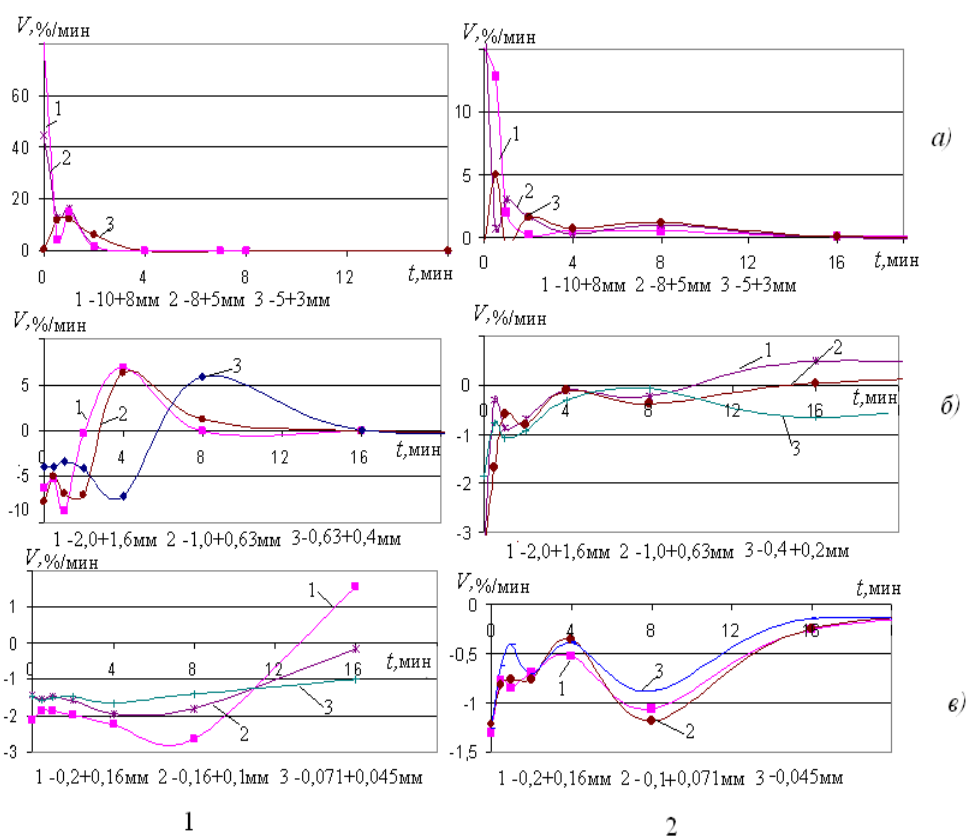


Рис. 3 – Скорости измельчения крупных (а), средних (б) и мелких (в) узких фракций бедной медно-никелевой руды в стержневой (1) и шаровой (2) мельницах

В этом случае скорость струйного измельчения достигает 10 %/мин, тогда как скорость стержневого измельчения – 5 %/мин, а шарового – до 0,5 %/мин. Эти все выводы надо проверять для каждого материала отдельно.

## **Выводы.**

1. Установлено, что для тонкого измельчения руд кривые уравнений кинетики имеют вид квадратичных парабол, коэффициенты которых зависят от свойств материала и вида мельницы.

2. Скорость измельчения для крупных фракций имеет убывающий характер, для средних и мелких фракций – знакопеременный характер.

3. Струйное измельчение имеет значительные преимущества по скорости измельчения средних и мелких фракций, что позволяет рекомендовать использовать его на третьем этапе измельчения материалов в замкнутом цикле.

1. *Ногаева К. А.* Исследование кинетики измельчения полиметаллической руды месторождения Кутесай 2 / *К. А. Ногаева, Т. Т. Арстанбеков, Г. Ш. Байкелова* // arch.kyrbnet.kg/uploads/KSTUNOGAEVA2010-21.pdf
2. *Ракаев А. И.* Закономерности измельчения бедных медно-никелевых руд в барабанных мельницах / *А. И. Ракаев, П. А. Шумилов* // Вестник МГТУ. – 2009. – Т. 12, №4. – С. 638 – 643.
3. *Пилов П. И.* Снижение энергопотребления в замкнутых циклах тонкого измельчения руд / *П. И. Пилов, Н. С. Прядко* // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2013. – №6. – С. 75 – 80.

Институт технической механики  
Национальной академии наук Украины  
и Государственного космического агентства Украины,  
Днепропетровск

Получено 12.09.14,  
в окончательном варианте 20.09.14