

¹ Факультет горного инжиниринга Университета Булент Эсевит
(Bulent Ecevit University), г. Зонгулдак, Турция

² Профессионально-техническая высшая школа Гоксеби М. М. Канакси
при Университете Булент Эсевит, г. Зонгулдак, Турция

УДК 666.76.002.68:622.73

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОМОЛА ОГНЕУПОРНЫХ ОТХОДОВ ПРИ ИХ ВТОРИЧНОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ

Керамическая промышленность является одной из отраслей, в которых широко применяются промышленные отходы, природное сырье частично заменяется отходами. Огнеупорные отходы измельчают и используют в определенных пропорциях в огнеупорном производстве. Цель нашего исследования — определить размолоспособность огнеупорных отходов и их кинетическое поведение. Способность к измельчению определяли экспериментальным путем с помощью технологии моноразмерной фракции (mono-size fraction technique). Моноразмерные образцы с зерновым составом –2360+1700, –1180+850 и –425+300 мкм измельчали в определенных объемах в течение определенного времени и затем измеряли показатель S_i . В конце каждого цикла помола материала определенного моноразмерного состава определяли полученный зерновой состав и способность материала к дальнейшему измельчению. Использовали шаровую мельницу и мельницу с мешалкой. В зависимости от продолжительности помола на обеих мельницах определяли также расход энергии и величину d_{80} измельчаемых материалов. Было замечено, что по мере того, как размер частиц уменьшается, скорость измельчения в шаровой мельнице также снижается, а скорость измельчения в мельнице с перемешиванием возрастает. Увеличение продолжительности помола ведет к росту расхода энергии, но значительного изменения размера d_{80} зерна при измельчении отработавших свой срок огнеупоров не наблюдается. Однако обнаружено, что размер d_{80} зерна значительно уменьшается при увеличении продолжительности помола в мельнице с мешалкой.

Ключевые слова: способность огнеупорных отходов к измельчению, удельная интенсивность измельчения, мельница с перемешиванием, шаровая мельница, повторное использование промышленных отходов.

ВВЕДЕНИЕ

Запасы природных ресурсов быстро уменьшаются в результате роста населения в мире и изменения потребительских привычек, поэтому человечество должно научиться рачительно использовать ресурсы путем применения вторичного сырья. Переработка отходов для повторного использования — долгосрочное капиталовложение. Она гарантирует снижение расхода энергии, поскольку при использовании вторсырья уменьшается число технологических операций при производстве продукции, снижается количество отходов, т. е. уменьшается отрицательное воздействие на окружающую среду, что, в свою очередь, означает сокращение площади свалок, снижение количества энергии, требуемой для транспортировки отходов и их размещения.

На огнеупорном предприятии в Зонгулдакском каменноугольном бассейне (Zonguldak

Basin) производятся (в зависимости от рыночного спроса) четыре различных вида продукции: огнеупорные изделия, монолитные огнеупоры, огнеупорные мертели и кладочные растворы. В зависимости от вида продукции определенное количество измельченных огнеупорных отходов добавляется в сырье: диоксид кремния, боксит, диатомит, связующие глины и др. Огнеупорные отходы — это отработавшие свой срок огнеупорные изделия, полученные в результате обновления футеровок промышленных печей на различных предприятиях.

Расходы на измельчение огнеупорных отходов составляют значительную долю общих производственных расходов. Помольное производство промышленных предприятий обычно потребляет много энергии, причем зачастую довольно неэффективно. Расход энергии особенно возрастает по мере того, как частицы измельчаемого материала становятся мельче, поскольку в этом случае возрастает сопротивление частиц дальнейшему измельчению. Существует много исследований по теме измельчения и определения взаимосвязи между расходом энергии и



Д. Кунадароглу
E-mail: dilekcu@yahoo.com

уменьшением крупности. Были также предприняты попытки разработки методов наиболее эффективного измельчения с наименьшим расходом энергии [1–5].

В данной работе исследованы поведение при измельчении и характеристики размолоспособности огнеупорных отходов. Работу проводили в лабораторных условиях с использованием мельниц с вертикально установленной мешалкой (vertical pinned stirred mill) и шаровой.

Поведение при измельчении и размолоспособность минералов, угля, смесей и других материалов были изучены в работах различных исследователей. В последние годы кинетические модели применяли и в лабораториях, и в промышленных масштабах [6–10]. Измельчение считается кинетическим процессом, поэтому к нему требуется кинетический подход. Для того чтобы сделать перемалывание более эффективным, для помольных производств была разработана кинетика измельчения в виде применяемых моделей [11]. Линейная кинетика измельчения (linear breakage kinetics) действует в тех случаях, когда на скорость измельчения определенной частицы и гранулометрический состав, полученный при первичном измельчении, не влияет среда внутри мельницы. Хотя линейная кинетика измельчения обычно соблюдается при определенных условиях дробления, но иногда при помоле в мельницах происходит отклонение от линейности [12, 13]. В линейной модели с комбинированными параметрами (linear combined parameter model) мельница рассматривается в качестве реактора, в котором мелкозернистый продукт получается при измельчении материала более крупной фракции. В этом случае материал, подаваемый в мельницу, можно характеризовать с точки зрения либо определенной фракции, либо целой группы фракций и считать его взаимодействующим веществом (реагентом).

Гранулометрический состав материала, подаваемого в мельницу, можно выразить графическим способом. При применении этого метода показатель интенсивности измельчения первого порядка (first order breakage rate) исчисляется с помощью логарифмического представления суммарной массы (%) к диаметру отверстий сита. Интенсивность измельчения материала различного гранулометрического состава различается. Если в мельнице происходит эффективное измельчение, то обычно к материалу определенного гранулометрического состава можно применить теорему измельчения первого порядка. Термин «первый порядок» означает, что реакция происходит без замедления. Если реакция замедляется, тогда интенсивность реакции становится второго или третьего порядка.

Для того чтобы лучше понять гипотезу измельчения первого порядка, рассмотрим мельницу, в которой находится образец массой W .

Когда находящийся в мельнице материал измельчается в течение серии все возрастающих промежутков времени, интенсивность измельчения будет подчиняться кинетике первого порядка. Так, например, интенсивность измельчения материала с зерновым составом i будет $S_i w_i W$, где S_i — интенсивность измельчения единицы массы материала с зерновым составом i за единицу времени; w_i — доля материала зернового состава i ; W — общая масса материала, измельчаемого в мельнице. Если исходный материал состоит из частиц верхнего диапазона размеров, определяемого 1-м диапазоном размеров частиц, т. е. из самой крупной фракции, то исчезновение частиц 1-го диапазона размеров пропорционально $w_1(t)W$ [14–17]. Поскольку общая масса материала остается постоянной в ходе перемалывания, это можно аналитически представить следующим образом:

$$-\frac{dw_1(t)}{dt} = S_1 w_1(t) \quad (1)$$

где S_1 — удельная интенсивность измельчения (величина является пропорционально постоянной); $w_1(t)$ — массовая доля задерживаемого в мельнице материала (mill hold-up) с гранулометрическим составом 1 за промежуток времени t [16, 18]. Величина S_1 берется как константа, как и время t , и определяется по угловому коэффициенту $w_1(t)/w_1(0)$ в зависимости от t на полулгарифмическом графике.

Измельчение мелкозернистых материалов согласно кинетике измельчения первого порядка называется нормальной зоной измельчения, а прочие методы, не подчиняющиеся кинетике измельчения первого порядка, называются аномальной зоной измельчения. Если частицы крупные, то нехватка энергии, требуемая шарам для эффективного измельчения частиц, а также снижение удельной интенсивности измельчения называются прямой неэффективностью (direct inefficiency). Частицы, которые не подвергаются измельчению при воздействии энергии шаров, считаются слишком крупными для измельчения. Кроме того, от крупных частиц могут откалываться мелкие частицы в результате появления надразов и вследствие абразивного воздействия. Это отрицательно влияет на качество и количество желаемого продукта. Гранулометрический состав, который получается при максимальной удельной интенсивности измельчения, зависит от свойств материала. Чем меньше твердость материала, тем больше размер частиц, при получении которого удельная интенсивность измельчения находится на максимуме [14–17] (рис. 1).

У некоторых материалов могут быть отклонения от кинетики измельчения первого порядка из-за особенностей мельницы или материала. Этому могут быть два объяснения. Первое заключается в том, что мелкий материал препятствует

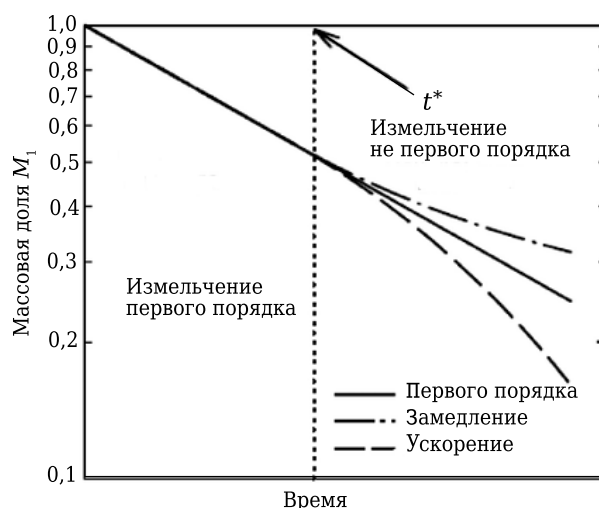


Рис. 1. Измельчение первого и не первого порядка материала одного гранулометрического состава

измельчению более крупного материала путем создания так называемого эффекта подушки. В результате увеличивается время, требуемое для измельчения. Это называется «эффект среды». Вторая причина заключается в отклонениях в аномальной зоне измельчения, когда размер измельчаемого зерна значительно больше диаметра шаров. В этом случае шары не воздействуют на более крупные частицы и какая-то часть материала оказывается более податливой к обработке, в то время как другая часть материала оказывается более прочной [12, 13, 16, 17].

Мельница с мешалкой представляет собой цилиндрическую трубу с расположенным по центру продольной оси перемешивающим механизмом. Перемешивающий механизм обычно является ротором с закрепленными на нем стержнями или диском. Он вызывает вращение мелющих тел. Мелющие тела могут быть из различных материалов, таких как сталь, стекло, цирконий, керамика, оксид алюминия и другие, в диапазоне размеров от нескольких миллиметров до 0,3 мм или мельче. Мельница с мешалкой предназначена для получения измельченного материала с зерновым составом от нескольких миллиметров до 1 мкм [19]. Такие мельницы могут быть горизонтальными или вертикальными. Измельчение может быть сухим или мокрым в зависимости от того, какой материал измельчается [20–24]. Усилие измельчения в мельницах с перемешиванием отличается от усилия измельчения в шаровой мельнице. При измельчении шарами уменьшение крупности материала зависит главным образом от ударных каскадных движений шаров. Частицы прижимаются к шарам и зажимаются между ними в слое материала на дне мельницы. Ударное напряжение, возникающее в результате торможения и каскадных движений, оказывается значительно больше по величине, чем касательное напряжение, возникающее в результате трения. Однако в мельницах

с перемешиванием основные механизмы измельчения зависят от касательных, сжимающих и крутящих напряжений, вызванных перемешиванием смеси из мелющих тел. Механизм перемешивания передает очень большую кинетическую энергию окружающим средствам для измельчения частиц. Передача происходит в радиальном направлении, где их консолидированная структура усиливает абразивные и поперечные силы, а не удар и сдавливание. Поперечные и абразивные силы являются главными причинами измельчения в субмикронном диапазоне [4, 16, 25–27].

Мельницы с перемешиванием очень эффективны в производстве тонкоизмельченного материала по сравнению с обычными вращающимися мельницами, так как они просты в дизайне и обслуживании, обладают высоким коэффициентом измельчения, потребляют мало энергии, не загрязняют измельчаемый материал продуктами износа своих деталей. Их используют во многих отраслях промышленности, таких как переработка минерального сырья, угля, керамическая промышленность, металлургия, лакокрасочная, химическая, пищевая промышленность, медицина и др. [28–34]. Некоторые примеры различных типов мельниц с перемешиванием: ветряная мельница (Towermill), мельница марки Вертимилл (Vertimill), марки Изамилл (Isamill), Сведолдетритор (Swedaladetritor), мельница марки Сала (Sala mill), ANI-Метзопротех SVM (ANI-Metsoprotech SVM), Максмилл (Maxmill).

Шаровые мельницы также широко используются, особенно в горнодобывающей промышленности. Шаровые мельницы применяют во многих отраслях промышленности: абразивной, химической, при подготовке топлива, в порошковой металлургии, при подготовке минералов, пигментов, в целлюлозно-бумажной промышленности, в производстве цемента и извести, при изготовлении стиральных порошков и пылевидного угля для производства энергии, при подготовке огнеупорных материалов, в керамической промышленности, фармацевтике, при подготовке минерального сырья и во многих других отраслях.

Поскольку производство очень мелких фракций требует тонкого измельчения, производство высокопроизводительных мельниц с перемешиванием очень важный вопрос. Без их использования невозможно достичь желаемой мелкозернистости. Обычные шаровые мельницы для этого непригодны.

ХОД ЭКСПЕРИМЕНТА

Материал

При исследовании использовали огнеупорные отходы, полученные с заводов Зонгулдак, Турция. Согласно информации, полученной от руководства заводов, огнеупорные отходы собирают по всей Турции, измельчают до 2 см с помощью щековой дробилки и складывают. На одном из предприятий продукт,

полученный на щековой дробилке, измельчается далее в шаровой мельнице до получения зернового состава, в котором 75 % материала составляет зерно –75 мкм. Далее этот материал используют для производства разных видов продукции.

Образцы материала отбирали с места его складирования после измельчения в щековой дробилке (2 см), а также из шаровой мельницы после его дальнейшего помола. Затем определяли гранулометрический состав. Результаты представлены на рис. 2.

Эксперименты по измельчению

Для проведения испытаний по измельчению использовали лабораторную шаровую мельницу и вертикальную мельницу с мешалкой.

Лабораторная шаровая мельница

Эксперименты по измельчению проводили на лабораторной шаровой мельнице длиной 30,5 и диаметром 30,5 см. Гладкая футеровка мельницы и закругленные углы способствуют освобождению ее от материала после проведения теста на измельчение. Стандартные условия по измельчению в мельнице марки «Bond» приведены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики шаровой мельницы марки «Bond» и условия проведения испытаний*

Мельница	Диаметр D , см	30,5
	Длина L , см	30,5
	Объем V , см ³	22200
	Частота вращения, об/мин	70
Мелющие тела	Диаметр d , мм	311031.75254019.0512.70
	Количество	43 43 67 10 71 94
	Общая масса, г	20125
	Плотность, г/см ³	7,79
	Шары определенного размера J	0,1940
	Плотность, г/см ³	2,2
Загружаемый материал	Масса порошка, г	2057
	Объемная доля загруженного в мельницу порошка f_c	0,07
	Соотношение количества порошка и шаров U	0,90
	* $J = \left(\frac{\text{масса шаров} / \text{плотность шаров}}{\text{объем мельницы}} \right) \frac{1,0}{0,6}$	
	$f_c = \left(\frac{\text{масса порошка} / \text{плотность порошка}}{\text{объем мельницы}} \right) \frac{1,0}{0,6}$	

$U = \frac{f_c}{0,4J}$, где $\left[\frac{1,0}{0,6} \right]$ — коэффициент пористости слоя, причем пористость шаров составляет 0,4, отсюда чистый объем стали 0,6 дает показатель «сталь плюс пористость» 1,0 (Остин и Климпель (Austin and Klimpel), 1984). Мельница вращалась с частотой 70 об/мин. Во всех экспериментах в мельницу загружали образец массой 2057 г. Это означает, что 90 % пустот между шарами было заполнено материалом образцов.

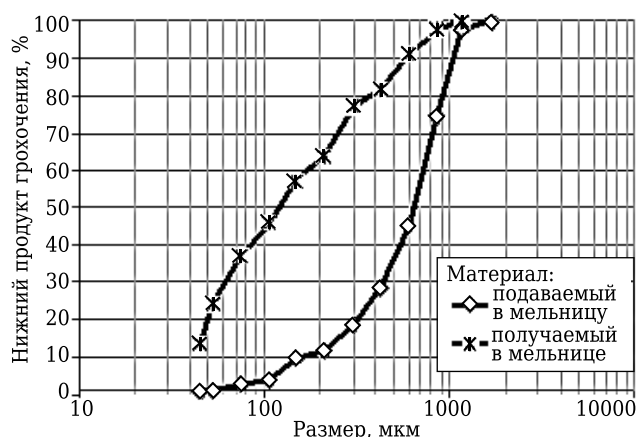


Рис. 2. Гранулометрический состав материала, подаваемого в шаровую мельницу и выходящего из нее

Лабораторная вертикальная мельница с перемешиванием

Для проведения испытаний по измельчению использовали лабораторную вертикальную мельницу с перемешиванием. Мельница с перемешиванием состоит из четырех основных элементов: корпуса, двигателя переменного тока, преобразователя, персонального компьютера. Материал в мельнице перемешивается с помощью мотора мощностью 2,2 кВт с частотой вращения 1496 об/мин. Для проведения испытаний с перемешиванием при различной скорости мельница была подсоединена к частотному преобразователю «Siemens Midi Master 1500». Объем мельницы 2495 см³, рабочий объем 2825 см³. В качестве мелющих тел использовали стальные шарики диаметром 6 мм. Шарики занимали 40 % рабочего пространства. Масса шариков 5590 г. Объем пустот между шариками измеряли с помощью воды. Было обнаружено, что масса материала, который заполнил 90 % пустот между шариками, 517 г. Скорость перемешивания можно было регулировать изменением частоты двигателя. В табл. 2 представлены различные величины частоты и, соответственно, различные скорости перемешивания.

Изучение поведения материала моноразмерной группы при его измельчении в шаровой мельнице и в мельнице с перемешиванием

Источники указывают на то, что показатели интенсивности измельчения материалов, имеющих различные моноразмерные фракции, отличаются друг от друга. Нами было изучено поведение ма-

Таблица 2. Скорость перемешивания в зависимости от частоты двигателя мельницы

Частота, Гц	Скорость перемешивания, об/мин	Частота, Гц	Скорость перемешивания, об/мин
5	148	30	898
10	298	40	1198
20	598	50	1496

териалов при измельчении экспериментальным способом с помощью технологии моноразмерной фракции. Образцы были классифицированы на три группы по зерновому составу: $-2360+1700$, $-1180+850$ и $-425+300$ мкм. Для этого использовали грохот Рассела (Russell screen). Образцы, имеющие моноразмерный гранулометрический состав, были измельчены в течение следующих промежутков времени: 5, 15, 30 с, 1, 2, 4, 6 и 8 мин для определения удельной интенсивности измельчения S_i . После каждого периода измельчения материал выгружали из мельницы и отбирали представительные образцы с помощью метода рифления (riffing method). Затем образцы подвергали сухому ситовому анализу с целью определения гранулометрического состава. Сухой просев использовали потому, что просеянный материал снова добавляли в материал для дальнейшего измельчения. В результате измельчения, отбора проб, просеивания и повторного измельчения одного и того же образца в течение следующего периода времени происходила некоторая потеря массы. При проведении наших испытаний потери массы оставались в приемлемых пределах, а именно менее 1,5 %. В конце испытания различных моноразмерных групп определили гранулометрические составы изучаемых материалов и их поведение при измельчении. С целью анализа поведения материала при его измельчении в течение различных периодов времени в шаровой мельнице и в мельнице с перемешиванием определили количество надситной фракции в узком диапазоне размеров зерен и составили графики зависимости количества надситной фракции от продолжительности измельчения. Область на графике, где поведение при измельчении линейно, называется «областью измельчения первой степени». Удельная интенсивность измельчения определяется по углу наклона линии в области измельчения первой степени.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведены испытания измельчения различных моноразмерных по зерновому составу материалов в шаровой мельнице и в мельнице с перемешиванием с целью определения их гранулометрического состава и поведения при измельчении. Опыты проводили с огнеупорными отходами.

На рис. 3 представлен гранулометрический состав материала в размерных группах $-2360+1700$, $-1180+850$ и $-425+300$ мкм. Материал был получен в конце периодов измельчения в шаровой мельнице. Соответствующие показатели поведения при измельчении представлены на рис. 4.

По мере увеличения размеров зерна материала, подаваемого в шаровую мельницу, возрастает скорость измельчения. Кроме того, на рис. 4 видно, что скорость измельчения была самой низкой при измельчении размерной группы $-425+300$

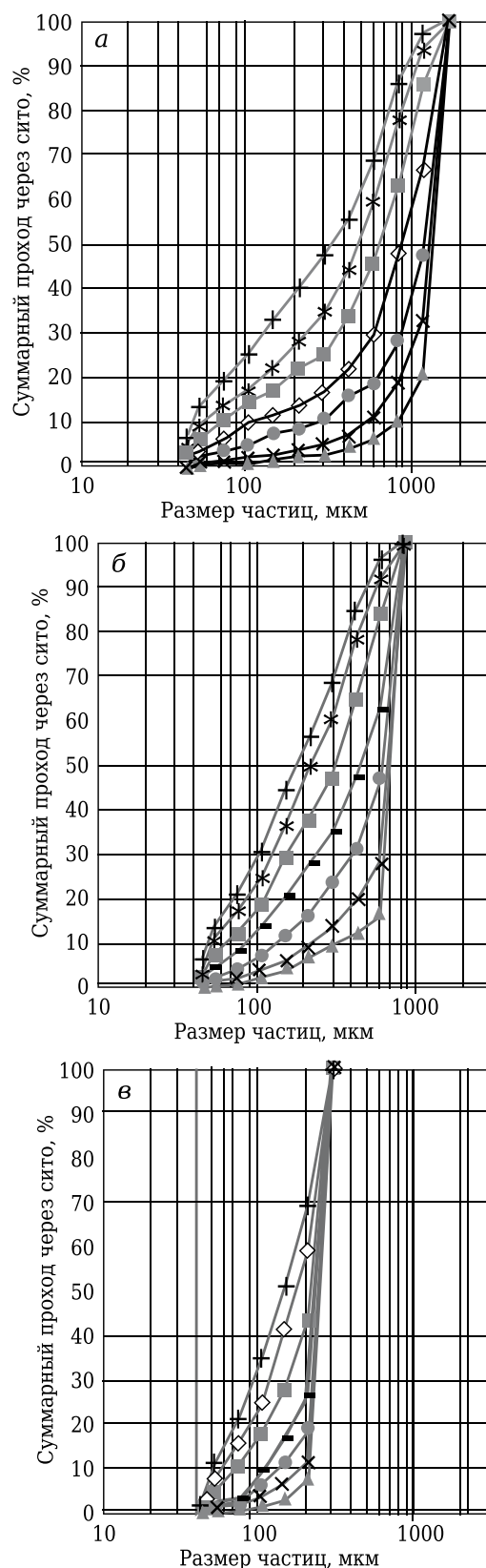


Рис. 3. Гранулометрический состав моноразмерных групп $-2360+1700$ (а), $-1180+850$ (б), $-425+300$ мкм (в). Материал измельчен в шаровой мельнице в различные периоды времени: ▲ — 15 с; × — 30 с; ● — 1 мин; ◇ — 2 мин; ■ — 4 мин; * — 6 мин; + — 8 мин



Рис. 4. Поведение материала при измельчении в шаровой мельнице

мкм, самая высокая скорость измельчения была достигнута при измельчении размерной группы $-2360+1700$ мкм. Скорость измельчения материала размерной группы $-1180+850$ мкм была по своей величине между двумя уже упомянутыми скоростями. Как видно по результатам, полученным при измельчении в шаровой мельнице (рис. 4), поведение при измельчении материала во всех трех размерных группах имеет линейную форму. Кроме того, не было замечено изменения (уменьшения) скоростей измельчения при увеличении его продолжительности.

Гранулометрический состав в конце каждого периода измельчения материала размерных групп $-2360+1700$, $-1180+850$ и $-425+300$ мкм в мельнице с перемешиванием представлен на рис. 5, соответствующее поведение при измельчении показано на рис. 6.

При измельчении в мельнице с перемешиванием скорость измельчения уменьшается по мере укрупнения зернового состава материала, подаваемого в мельницу. Самая высокая скорость была достигнута при измельчении размерной группы $-425+300$ мкм, а самая низкая при измельчении размерной группы $-2360+1700$ мкм. Показатель скорости измельчения материала размерной группы $-1180+850$ мкм находился между показателями скорости двух упомянутых размерных групп. Как видно на рис. 6, при измельчении материала в мельнице с перемешиванием поведение моноразмерной группы $-425+300$ мкм оказалось почти линейным, т. е. заметного изменения скорости измельчения при увеличении продолжительности процесса не произошло. Скорость измельчения материала этой размерной группы оказалась выше, чем скорость измельчения материала двух других размерных групп. У материала моноразмерных групп $-2360+1700$ мкм и $-1180+850$ мкм поведение при измельчении нелинейно. Скорость измельчения замедляется примерно через 1 мин после его начала.

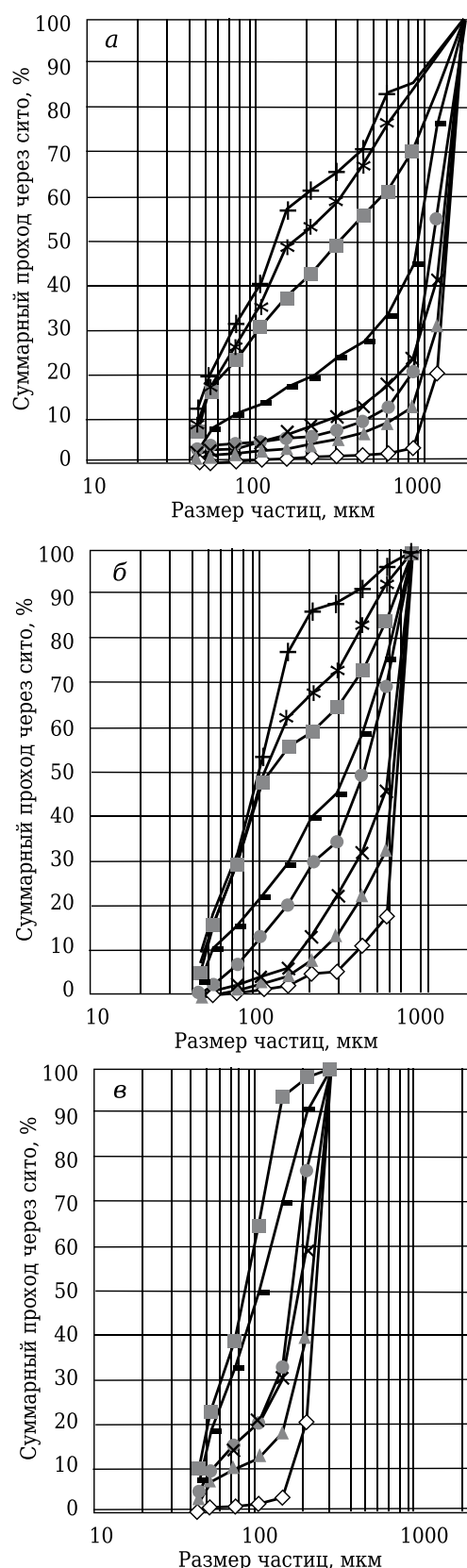


Рис. 5. Гранулометрический состав моноразмерной группы $-2360+1700$ (а), $-1180+850$ (б), $-425+300$ мкм (в). Материал измельчен в мельнице с перемешиванием в различные периоды времени: $\diamond$ — 5 с; $\blacktriangle$ — 15 с; $\times$ — 30 с; $\bullet$ — 1 мин; $\blacksquare$ — 2 мин; $\blacksquare$ — 4 мин; $*$ — 6 мин; $+$ — 8 мин

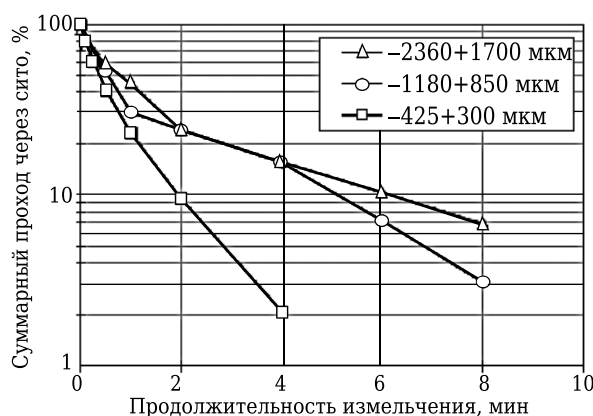


Рис. 6. Поведение материала при измельчении в мельнице с перемешиванием

В исследованиях, проведенных различными учеными с разными материалами, измельчаемыми в мельнице с перемешиванием, была обнаружена нелинейная кинетика измельчения (или кинетика не первого разряда). Другими словами, интенсивность измельчения замедляется по мере увеличения продолжительности измельчения [4, 9, 12, 20, 25, 29]. Причиной замедления является наличие зерна, более крупного по размеру, чем диаметр измельчающих средств: получается «эффект подушки» из-за того, что мелкие частицы покрывают поверхность материала и изменяют его структурные свойства.

Сравнение поведения материала при измельчении в шаровой мельнице и в мельнице с перемешиванием

После сравнения поведения материала при его измельчении в шаровой мельнице и мельнице с перемешиванием были составлены графики поведения материала при измельчении первой степени. При этом не принимались во внимание те области, в которых поведение материала при измельчении отличалось от линейного. Была учтена продолжительность измельчения, при которой происходило измельчение первой степени по всем размерным группам.

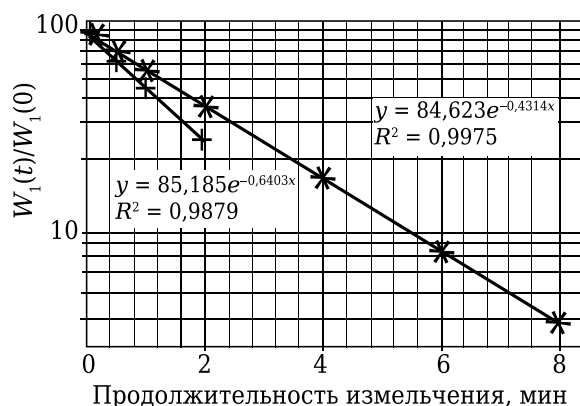


Рис. 8. Поведение материала при измельчении первой степени размерной группы –2360+1700 мкм в шаровой мельнице (*) и в мельнице с перемешиванием (+)

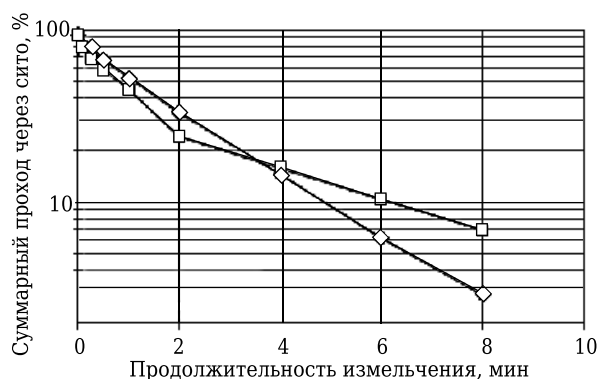


Рис. 7. Поведение материала при измельчении размерной группы –2360+1700 мкм в шаровой мельнице (◇) и в мельнице с перемешиванием (□)

На рис. 7 представлено поведение материала при измельчении различных размерных групп в шаровой мельнице и в мельнице с перемешиванием. Соответствующие типы поведения при измельчении первой степени представлены на рис. 8. Видно, что удельная интенсивность измельчения этой размерной группы 0,4314 для шаровой мельницы и 0,6403 для мельницы с перемешиванием, т. е. скорость измельчения в мельнице с перемешиванием почти в 1,5 раза превышает скорость измельчения в шаровой мельнице.

На рис. 9 показано поведение материала при измельчении размерной группы –1180+850 мкм в шаровой мельнице и в мельнице с перемешиванием. Соответствующие типы поведения при измельчении первой степени представлены на рис. 10. Видно, что удельная интенсивность измельчения данной размерной группы 0,3997 для шаровой мельницы и 1,1336 для мельницы с перемешиванием. Скорость измельчения в мельнице с перемешиванием была почти в 3 раза (2,84 раза) выше, чем скорость измельчения в шаровой мельнице.

Поведение материала при измельчении размерной группы –425+300 мкм в шаровой мельнице и в мельнице с перемешиванием представлено на рис. 11, соответствующее поведение при из-

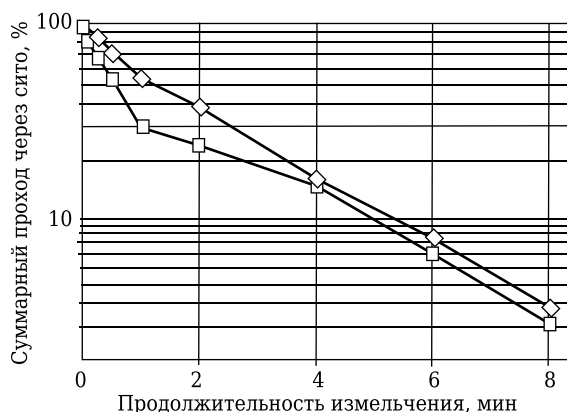


Рис. 9. Поведение материала при измельчении размерной группы –1180+850 мкм в шаровой мельнице (◇) и в мельнице с перемешиванием (□)

мельчении первой степени — на рис. 12. Удельная интенсивность измельчения материала этой размерной группы 0,1397 для шаровой мельницы и 1,4239 для мельницы с перемешиванием. Скорость измельчения в мельнице с перемешиванием оказалась в 10 раз выше, чем скорость измельчения, полученная в шаровой мельнице.

Показатели удельной интенсивности измельчения узких размерных групп материала в шаровой мельнице и в мельнице с перемешиванием, а также соотношение удельной интенсивности измельчения в мельнице с перемешиванием и удельной интенсивности измельчения в шаровой мельнице представлены в табл. 3. По мере того, как размерная группа становится мельче, скорость измельчения в шаровой мельнице замедляется, а в мельнице с перемешиванием увеличивается. Размолоспособность более мелких размерных групп материала лучше в мельнице с перемешиванием, чем в шаровой мельнице.

Расход энергии в шаровой мельнице и в мельнице с перемешиванием

Расход энергии при измельчении размерной группы –425+300 мкм в шаровой мельнице и в мельнице с перемешиванием в течение различных периодов времени замеряли в киловатт-часах счетчиком, подсоединенным к системе с помощью обратного преобразователя. Был также определен показатель d_{80} зернового состава материала, полученного в конце различных по продолжительности периодов помола. В табл. 4 представлены показатели d_{80} и соответствующий расход энергии. На рис. 13 показан график, демонстрирующий взаимосвязь между показателями d_{80} и потреблением энергии.

Энергию, потребляемую при измельчении огнеупорных отходов в лабораторной шаровой мельнице и в мельнице с перемешиванием в течение различных по продолжительности периодов времени, сравнивали с учетом показателя размеров частиц d_{80} . Было обнаружено, что потребление энергии при помоле огнеупорных отходов в лабораторной шаровой мельнице возрастало по мере увеличения продолжительности помола, но при этом не происходило заметного изменения показателя размера d_{80} зерна. В мельнице с перемешиванием показатель d_{80} уменьшался в зависимости от продолжительности помола.

Таблица 3. Удельная интенсивность измельчения в мельнице с перемешиванием и в шаровой мельнице в зависимости от размерных групп

Размерная группа, мкм	Удельная интенсивность измельчения S_i		S_i шаровой мельницы / S_i мельницы с перемешиванием
	шаровая мельница	мельница с перемешиванием	
–2360+1700	0,4314	0,6403	1,5
–1180+850	0,3997	1,1336	2,84
–425+300	0,1397	1,4239	10

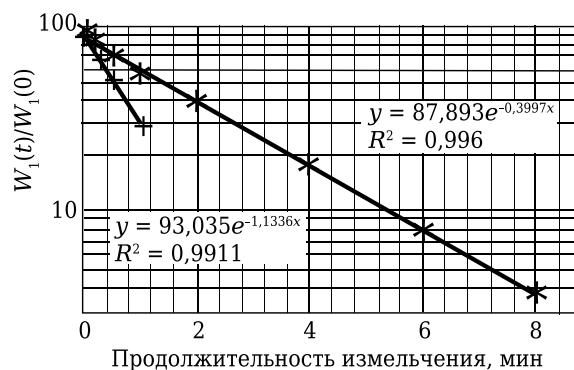


Рис. 10. Поведение материала при измельчении первой степени размерной группы –1180+850 мкм в шаровой мельнице (*) и в мельнице с перемешиванием (+)

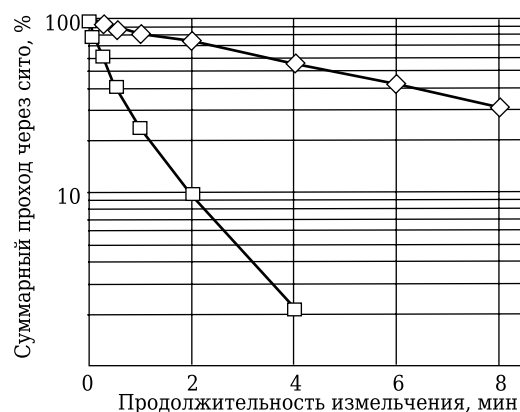


Рис. 11. Поведение материала при измельчении размерной группы –425+300 мкм в шаровой мельнице (◇) и в мельнице с перемешиванием (□)

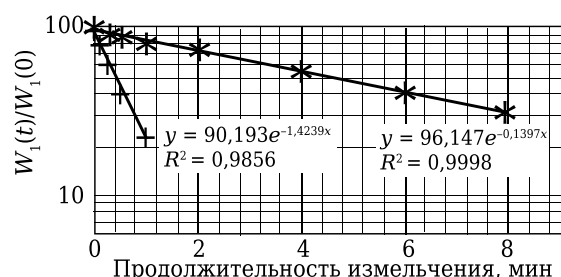


Рис. 12. Поведение материала при измельчении первой степени размерной группы –425+300 мкм в шаровой мельнице (*) и в мельнице с перемешиванием (+)

Таблица 4. Показатели d_{80} и потребления энергии в конце различных по продолжительности периодов измельчения материала

Продолжительность помола, мин	Шаровая мельница		Мельница с перемешиванием	
	d_{80} , мкм	энергия, кВт/ч, за определенное время	d_{80} , мкм	энергия, кВт/ч, за определенное время
0,25	283	2	274	3
0,5	280	3	260	8
1	277	5	235	14
2	275	8	190	31
4	269	14	154	53
6	257	26		
8	244	55		

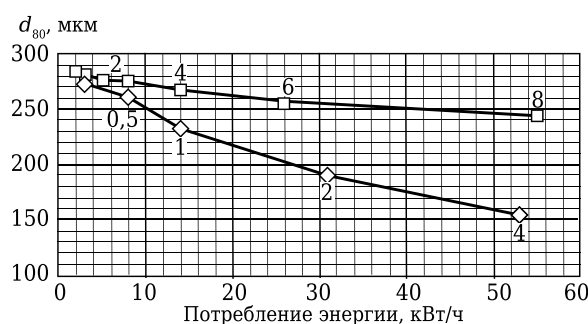


Рис. 13. Показатели d_{80} и соответствующее потребление энергии за определенное время при измельчении материала в шаровой мельнице (□) и мельнице с перемешиванием (◊). На кривых указано время, мин

Сравнение потребления энергии и показателя размеров d_{80} зерна в зависимости от увеличения продолжительности помола

В шаровой мельнице при потреблении энергии 5 кВт/ч в конце периода измельчения продолжительностью 1 мин показатель d_{80} составил 277 мкм. Когда продолжительность помола достигла 4 мин, показатель d_{80} материала составил 269 мкм. При продолжительности помола 6 мин потребление энергии 26 кВт/ч, d_{80} 257 мкм. В мельнице с перемешиванием потребление энергии составило 14 кВт/ч в конце периода измельчения продолжительностью 1 мин, показатель d_{80} при этом составил 235 мкм. Когда продолжительность помола достигла 4 мин, показатель d_{80} составлял 154 мкм.

Сравнение показателя d_{80} , полученного при потреблении одинакового количества энергии в обеих мельницах

Показатель d_{80} составил в шаровой мельнице 244 мкм при потреблении энергии 55 кВт/ч и 154 мкм в мельнице с перемешиванием при потреблении энергии 53 кВт/ч. Некоторая часть энергии, потребляемой в обычных барабанных мельницах, напрямую используется для измельчения. Однако относительно большая ее часть тратится на образование тепла и шума. Кроме того, при помоле частиц до размера менее 75 мкм эффективность барабанных мельниц значительно снижается, а потребление энергии сильно возрастает. Так

что осуществление помола на таких мельницах неэкономично [21]. При использовании мельниц с перемешиванием экономически эффективный помол можно осуществлять и до размера частиц менее 10 мкм. Это подтверждается тем, что хотя количество энергии, подаваемой в мельницу с перемешиванием для измельчения определенного объема материала в течение определенного времени, очень высоко, потребление энергии по сравнению с необходимым для барабанных мельниц низкое [35, 36]. При промышленном использовании мельниц с перемешиванием потребление энергии оказывается на 60 % меньше, чем в обычных мельницах, например в конце цикла измельчения материала до размера зерен 6 мкм при производительности 20 т/ч [2].

Поскольку минимальный размер шаров, используемых в шаровых мельницах, 25 мм, энергия, передаваемая на минерал, измельчаемый в результате ударных движений, недостаточна для получения тонкомолотого материала. Следовательно, для измельчения материала до мелкой фракции необходимы усилия сжатия и скручивания. Материал остается крупнозернистым в шаровых мельницах, в которых преобладают силовые воздействия в виде столкновения и абразивные воздействия. Экономически оправданным пределом работы шаровых мельниц является помол до размера частиц 100 мкм. Удельное потребление энергии в шаровых мельницах повышается в геометрической прогрессии по достижении этого предела [19, 37, 38]. Сообщается, что если размер зерна подаваемого на помол материала меньше 0,5 мм, мельницы с перемешиванием являются более экономичным вариантом, чем шаровые. Они обеспечивают экономию энергии на уровне 25–50 % при измельчении до зерна среднего размера, которое характеризуется $d_{80} \geq 5$ мкм (Miranda and Yaeger, 1998). После сравнения энергопотребления в ходе помола в шаровой мельнице и в мельнице с перемешиванием сделан вывод, что помол в мельнице с перемешиванием более экономичен. Было доказано, что помол в мельнице с перемешиванием является альтернативой используемому в настоящее время на предприятии помолу в шаровой мельнице. Благодаря этому можно измельчить материал более эффективно и более экономично.

Библиографический список

1. **Bond, F. C.** Third theory of comminution / F. C. Bond // Trans. AIME. — 1952. — Vol. 193. — P. 484–494.
2. **Mankosa, M. J.** Effect of media size in stirred ball mill grinding of coal / M. J. Mankosa, G. T. Adel, R. H. Yoon // Powder Technology. — 1986. — Vol. 49. — P. 75–82.
3. **Zheng, J.** A study on grinding and energy input in stirred media mills / J. Zheng, C. C. Harris, P. Somasundaran // Powder Technology. — 1996. — Vol. 86. — P. 171–178.
4. **Gao, M. W.** A study on the effect of parameters in stirred ball milling / M. W. Gao, E. Forssberg // Int. J. Miner. Processing. — 1993. — Vol. 37. — P. 45–59.
5. **Ipek, I.** Dry grinding kinetics of binary mixtures of ceramic raw materials by Bond Milling / I. Ipek, Y. Ucbas, M. Yekeler [et al.] // Ceramics International. — 2005. — Vol. 31. — P. 1065–1071.
6. **Cuhadaroglu, A. D.** Characterization of the grinding behavior of binary mixtures of clinker and colemanite / A. D. Cuhadaroglu, S. Kizgut, S. Yilmaz [et al.] // Particulate Sci. and Technology. — 2013. — Vol. 31, № 6. — P. 596–602.
7. **Samanli, S.** A simulation study of laboratory scale ball and vertical stirred mills / S. Samanli, D. Cuhadaroglu,

- S. Kizgut // Part. & Part. Syst. Characterization. — 2009. — Vol. 26. — P. 256–264.
8. **Samanli, S.** Investigation of breakage behavior of coal in a laboratory-scale stirred media mill / S. Samanli, D. Cuhadaroglu, Y. Ucbas [et al.] // Int. J. of Coal Preparation and Utilization. — 2010. — Vol. 30, № 1. — P. 20–31.
9. **Samanli, S.** An investigation of particle size variation in stirred mills in terms of breakage kinetics / S. Samanli, D. Cuhadaroglu, J. Y. Hwang // Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. — 2011. — Vol. 33, № 6. — P. 549–561.
10. **Ipek, I.** Ternary-mixture grinding of ceramic raw materials / I. Ipek, Y. Ucbas, M. Yekeler [et al.] // Minerals Engineering. — 2005. — Vol. 18, № 1. — P. 45–49.
11. **Austin, L. G.** The process engineering of size reduction: Ball milling / L. G. Austin, R. R. Klimpel, P. T. Luckie. — New York : SME-AIME, 1984.
12. **Zhenhua, M.** Breakage behavior of quartz in a laboratory stirred ball mill / M. Zhenhua, H. Sian, Z. Shaoming, P. Xinzhang // Powder Technology. — 1998. — Vol. 100. — P. 69–73.
13. **Bilgili, E.** Formulation of a non-linear framework for population balance modeling of batch grinding: Beyond first-order kinetics / E. Bilgili, J. Yepes, B. Scarlett // Chem. Eng. Sci. — 2006. — № 61. — P. 33–44.
14. **Klimpel, R. R.** Determination of selection for breakage functions in the batch grinding equation by nonlinear optimization / R. R. Klimpel, L. G. Austin // Ind. Eng. Chem. Fundamen. — 1970. — № 9. — P. 230–237.
15. **Austin, L. G.** Rate equations for non-linear breakage in mills due to material effects / L. G. Austin, K. Shoji, D. Bell // Powder Technology. — 1982. — Vol. 31. — P. 127–133.
16. **Austin, L. G.** The kinetics and shape factors of ultrafine dry grinding in laboratory ball mill / L. G. Austin, M. Yekeler, T. F. Dumn [et al.] // Particle & Particle System Characterization. — 1990. — № 7. — P. 224–247.
17. **Fuerstenau, D. W.** Linear and nonlinear particle breakage process in comminution systems / D. W. Fuerstenau, A. De, P. C. Kapur // Int. J. Miner. Processing. — 2004. — Vol. 74. — P. 317–327.
18. **Deniz, V.** The effect of mill speed on kinetic breakage parameters of clinker and limestone / V. Deniz // Cement Concreate Research. — 2004. — Vol. 34. — P. 1365–1371.
19. **Pilevneli, C. C.** Open and closed circuit dry grinding of cement mill rejects in a pilot scale vertical stirred mill / C. C. Pilevneli, S. Kizgut, I. Toroglu [et al.] // Powder Technology. — 2003. — Vol. 139. — P. 165–174.
20. **Tuzun, M. A.** Effect of pin tip velocity, ball density and ball size on grinding kinetics in a stirred ball mill / M. A. Tuzun, B. K. Loveday, A. L. Hinde // Int. J. of Mineral Processing. — 1995. — Vol. 43. — P. 179–191.
21. **Jankovic, A.** Variables affecting the fine grinding of minerals using stirred mills / A. Jankovic // Minerals Engineering. — 2003. — Vol. 16. — P. 337–345.
22. **Jankovic, A.** The shape of product size distributions in stirred mills / A. Jankovic, S. Sinclair // Minerals Engineering. — 2006. — Vol. 19. — P. 1528–1536.
23. **Sinnott, M.** Analysis of stirred mill performance using DEM simulation. Part 1. Media motion, energy consumption and collisional environment / M. Sinnott, P. W. Clearly, R. Morrison // Minerals Engineering. — 2006. — Vol. 19. — P. 1537–1550.
24. **Ding, Z.** Effect of grinding parameters on the rheology of pyrite-heptane slurry in a laboratory stirred media mill / Z. Ding, Z. Yin, L. Liu [et al.] // Minerals Engineering. — 2007. — Vol. 20. — P. 701–709.
25. **Orumwense, O. A.** Super-fine and ultra-fine grinding-A literature survey / O. A. Orumwense, E. Forssberg // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. — 1992. — № 11. — P. 107–127.
26. **Blecher, L.** Energy distribution and particle trajectories in a grinding chamber of a stirred ball mill / L. Blecher, J. Schwedes // Int. J. of Mineral Processing. — 1996. — Vol. 44. — P. 617–627.
27. **Wills, B. A.** Mineral processing technology / B. A. Wills ; 3rd ed. — N. Y. : Pergamon Press, 1985.
28. **Kizgut, S.** Stirred grinding of coal bottom ash to be evaluated as a cement additive / S. Kizgut, D. Cuhadaroglu, S. Samanli // Energy Sources. Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. — 2010. — Vol. 32, № 16. — P. 1529–1539.
29. **Mankosa, M. J.** Effect of operating parameters in stirred ball mill grinding of coal / M. J. Mankosa, G. T. Adel, R. H. Yoon // Powder Technology. — 1989. — Vol. 59. — P. 255–260.
30. **Fadhel, H.** Wet batch grinding of alumina in a stirred bead mill / H. Fadhel, C. Frances // Powder Technology. — 2001. — Vol. 119. — P. 257–268.
31. **Wang, Y.** Product size distribution in stirred media mills / Y. Wang, E. Forssberg // Minerals Engineering. — 2000. — Vol. 13. — P. 459–465.
32. **Mehta, R. K.** A novel energy efficient process for ultra-fine coal grinding / R. K. Mehta, C. W. Schultz // Int. J. of Coal Preparation and Utilization. — 1992. — № 10. — P. 119–132.
33. **Cho, H.** Investigation of the grind limit in stirred media milling / H. Cho, M. A. Waters, R. Hogg // Int. J. of Mineral Processing. — 1996. — Vol. 44. — P. 607–615.
34. **Karbstein, H.** Scale-up for grinding in stirred ball mills / H. Karbstein, F. Muler, R. Polke // Aufbereitungstechnik. — 1996. — Vol. 37. — P. 469–479.
35. **Kwade, A.** Motion and stress intensity of grinding beads in a stirred media mill. Part 2. Stress intensity and its effect on comminution / A. Kwade, L. Blecher, J. Schwedes // Powder Technology. — 1996. — Vol. 86. — P. 69–76.
36. **Kwade, A.** Breaking characteristics of different materials and their effect on stress intensity and stress number in stirred media mills / A. Kwade, J. Schwedes // Powder Technology. — 2002. — Vol. 122. — P. 109–121.
37. **Liddell, K. S.** Machines for fine milling to improve the recovery of gold from calcines and pyrite / K. S. Liddell ; ed. C. E. Fivaz, R. P. King // Proc. Int. Conf. on Gold. — 1986. — Vol. 2. — Johannesburg : South African Institute of Mining and Metallurgy. — P. 405–417.
38. **Anonymous.** Energy saving ultrafine grinding with the SALA agitated mill // ZementKalkGips. — 2002. — Vol. 46. — P. 600, 601. ■

Получено 26.01.15

© Д. Кунадароглу, Э. Кара, 2015 г.

© — Пер. С. Н. Клявлиева

(ОАО «Комбинат «Магнезит»), 2015 г.