

РАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ ПРОЦЕССА ДИСПЕРГИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ В АГРЕГАТАХ РАЗДАВЛИВАЮЩЕГО ТИПА С ПРОТОЧНОЙ КЛАССИФИКАЦИЕЙ И СОЗДАНИЕ НА ИХ ОСНОВЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ПОМОЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Вайтехович П.Е., кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой машин и аппаратов химических и силикатных производств, УО «Белорусский государственный технологический университет»

Францкевич В.С., ассистент кафедры машин и аппаратов химических и силикатных производств, УО «Белорусский государственный технологический университет»

Проведен анализ теоретических моделей разрушения хрупких материалов. Установлено, что большинство из них базируется на теории микротрещин Гриффитса. В развитие этой теории подтверждено наличие пластических деформаций перед актом разрушения практически у всех хрупких материалов. Работа внешних сил при диспергировании затрачивается на преодоление упругой пластической деформации образования новой поверхности и придания продуктам дробления кинетической энергии. За основной принцип дезинтеграции материалов принят метод свободного дробления, который в совокупности с замкнутым циклом работы обеспечивает наиболее низкие энергозатраты. Базовым вариантом для исследования принята валково-тарельчатая мельница, в которой реализуется указанный принцип измельчения. Предложена модель измельчения материалов в слое с использованием эффективного модуля упругости. Расчеты с использованием модели показали нецелесообразность чрезмерного увеличения высоты слоя материала, так как это приводит к неоправданному увеличению энергозатрат. Проведены экспериментальные исследования по диспергированию цементного клинкера в лабораторной мельнице. Установлено влияние некоторых технологических и конструктивных параметров на эффективность помола и удельные энергозатраты на помол.

Создание энергосберегающих технологий и оборудования при одновременном снижении их металлоемкости является одной из ключевых задач научно-технического прогресса. Естественно, что при ее решении внимание в первую очередь должно уделяться оборудованию, реализующему технологические процессы, наиболее энергоемкие по своей природе и вносящие преобладающий вклад в промышленное энергопотребление в целом.

В промышленности строительных материалов к таким процессам относятся тонкое измельчение различных материалов. Процесс измельчения требует больших энергетических затрат и сопряжен с безвозвратной потерей металла из-за износа рабочих элементов. В ряде работ [1, 2] отмечается, что на измельчение затрачивается около 10 % производимой в мире электроэнергии и несколько миллионов тонн высококачественной стали.

Большие энергетические затраты объясняются не только большими объемами перерабатываемых материалов, но и тем, что используемые для измельчения машины, особенно для помола, отличаются чрезвычайно низкой эффективностью, и КПД их составляет в лучшем случае несколько процентов. Однако известно, что удельный расход энергии значительно зависит не только от конструкции измельчителя, но и от способа измельчения и выбора рациональной схемы помола. Поэтому за счет выбора оптимального способа и более совершенной конструкции мельницы можно значительно понизить расход электроэнергии на помол.

Одними из перспективных измельчителей для помола различных материалов являются валково-тарельчатые мельницы с воздушной классификацией готового продукта (в различных странах их еще называют вертикальные валковые мельницы, валковые среднеходные мельницы). К их преимуществам можно отнести компактность, относительно небольшой расход энергии на помол, малый износ рабочих органов, низкую инерционность. Эти мельницы работают в замкнутом цикле с воздушным сепаратором, легко перестраиваются на требуемую тонкость помола и часто используются в качестве помольно-сушильных комплексов с пневмотранспортом готового продукта.

Несмотря на очевидные преимущества, помольные агрегаты с валково-тарельчатыми мельницами у нас практически не используются. Это обусловлено отсутствием работ по комплексному исследованию таких агрегатов, определению их оптимальных конструктивных и технологических параметров, созданию методов расчета. Учитывая перспективность помольных агрегатов с валковыми мельницами и необходимость их использования в различных отраслях промышленности нашей страны, именно этот агрегат и процессы, проходящие в нем, выбраны в качестве объекта исследования.

Анализ моделей механизма разрушения материалов в процессе измельчения.

Значительное количество материалов, подвергаемых измельчению, имеют кристаллическую структуру. Механические свойства кристаллов, как совокупности многих частиц (атомов, ионов или молекул), образующих правильную решетку, определяются его составом, силами взаимодействия частиц, структурой кристалла и наличием в нем разного рода дефектов. Так как расстояние между взаимодействующими частицами внутри кристалла во много раз меньше, чем расстояние между взаимодействующими частицами при сцеплении кристаллов, то, естественно, силы сцепления внутри кристаллов во много раз больше сил сцепления кристаллов. Кроме того, в горных породах, уже в начальном состоянии имеется система микроскопических трещин и пор. При внешнем воздействии на хрупкое тело размеры микроповреждений быстро растут, и наступает разрушение. Если к кристаллу приложить механическое напряжение, то прежде чем разрушиться, он пройдет стадии упругой, а затем пластической деформации.

Что касается самих кристаллов, то их теоретическую прочность можно рассчитать по силам взаимодействия частиц в кристалле. Однако идеальную прочность твердые тела имели бы при идеальной кристаллической структуре. Реальная прочность на несколько порядков меньше теоретической. Эти расхождения между теоретической и реальной прочностью объясняются дефектами кристаллической структуры. Эти дефекты возникают в процессе роста кристалла или в результате различных воздействий на него. На прочность кристаллов наибольшее влияние оказывают дислокации. Под влиянием внешней нагрузки дислокации легко перемещаются, взаимодействуют между собой и с другими дефектами, объединяются и выходят на поверхность кристалла. Уже само смещение структуры хотя бы на один ряд атомов ослабляет кристалл. Дислокации способствуют образованию зародышевых трещин, развивающихся далее в трещины разрушения [3-5]. Однако дефекты могут появляться не только при пластической деформации, а значительно раньше. Причинами их появления могут быть повреждения кристаллической решетки при добыче материала, разная тепло- и электропроводность, термическое расширение компонентов, составляющих породу.

Энергия, которая подводится к телу при его нагружении, переходит в энергию деформации, накапливаемую в материале, и в поверхностную энергию трещин. Согласно исследованиям Гриффитса [6], при достижении некоторой критической длины трещина дальше будет распространяться самостоятельно. Критическое напряжение при этом

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{2 \cdot A_{\text{отн}} \cdot E}{l_1}}, \quad (1)$$

где σ_k – критическое напряжение, МПа;
 $A_{\text{отн}}$ – относительная поверхностная энергия, Дж/м²;
 E – модуль упругости материала, МПа;
 l_1 – критическая длина трещины, м.

Относительная поверхностная энергия это энергия, которая накапливается на поверхности до тех пор, пока ее не станет достаточно для разрушения кристалла, т.е. для образования новой поверхности.

Теоретическая прочность это напряжение отрыва одной части кристалла от другой при одновременном разрыве связей между всеми атомами. Ее можно рассчитать по формуле [7]

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{2 \cdot A_{\text{отн}} \cdot E}{l_2}}, \quad (2)$$

где σ_m – теоретическая прочность, МПа;
 l_2 – расстояние между атомами, м.

При сравнении критического и теоретического напряжений видно, что

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_m} = \sqrt{\frac{l_2}{l_1}}$$

(3)

Таким образом, отношение реальной и теоретической прочности определяются соотношениями межатома расстояния и размера трещины. Обычно истинная прочность материалов на 3–4 порядка ниже теоретической, что, по мнению Гриффитса, является следствием содержания в них мелких трещин, у которых происходит сильная концентрация напряжений. Под действием приложенного растягивающего напряжения на краях микротрещин возникает локальное перенапряжение, которое во много раз превосходит среднее напряжение, рассчитанное на все сечение куска материала. Если перенапряжение в вершине наиболее опасной трещины достигает теоретической прочности, то происходит быстрое (со скоростью звука) разрастание трещины и материал разделяется на части. Приложенное среднее напряжение в этот момент соответствует критическому напряжению. При перенапряжении, меньше теоретической прочности, трещина не растет и материал не разрушается.

Эти рассуждения дают основание подтвердить уменьшение прочности реальных горных пород в сравнении с теоретическим кристаллом. Многие материалы действительно разрушаются почти сразу после упругой деформации. Однако чем меньше размер частицы, тем большая пластическая деформация предшествует разрушению. Для каждого материала есть некоторый критический размер, ниже которого возникает только пластическая деформация и частицы не разрушаются.

О наличии предшествующих разрушению пластических деформаций упоминают многие исследования [7, 8]. Уолкер и Шоу [7] утверждают, что механизм разрушения минералов приближается к механизму разрушения металлов. Их концепция основывается на том, что в так называемых хрупких минералах во время измельчения появляются пластические деформации. А в ряде работ [9] экспериментально доказывается, что все хрупкие тела обладают, хотя и малой, пластичностью. Пластическое деформирование хрупких тел несущественно при разрушении крупных образцов, но в процессе измельчения размеры кусков уменьшаются, и его роль становится все более значительной. На пластическое деформирование затрачивается значительная доля энергии измельчения, вполне сопоставимая с энергией предельного упругого деформирования. В реальных условиях при тонком измельчении, когда помолу одновременно подвергается большое количество частиц материала, процесс протекает значительно сложнее. Расход энергии на тонкое измельчение значительно возрастает. Часто высокий удельный расход энергии при тонком измельчении объясняют только изменением прочности. Чем меньше частицы, тем меньше в материале внутренних дефектов, тем они прочнее и, следовательно, на их измельчение требуются большие затраты энергии. Это объяснение справедливо, но далеко не исчерпывающее. При помолу некая доля частиц, достигнув требуемого размера, оставаясь в общей массе материала, воспринимают на себя часть воздействующих

уменьши, гасят их, переизмельчаются и резко тормозят течение процесса в нужном направлении. Выходом из такого положения может быть измельчение в обратном цикле, при котором переизмельченные частицы выносятся бы из зоны помола. С увеличением дисперсности частиц возрастает и эффект взаимодействия частиц друг с другом. В результате наблюдается образование из очень мелких частиц коагуляционных структур, на разрушение которых затрачивается значительная доля энергии, подводимой к частице.

Рассматривая совокупность процессов при измельчении (диспергировании), Ребиндер [10] показал, что в принципе работа измельчения A складывается из работы упругой деформации $A_{упр}$, работы пластической деформации $A_{пл}$, работы разделения на более мелкие части $A_{нов}$ и работы на придание разделяющимся частям кинетической энергии A_k :

$$A = A_{упр} + A_{пл} + A_{нов} + A_k. \quad (4)$$

Полезной в данном уравнении с точки зрения теории процессов измельчения является работа образования новой поверхности ($A_{нов}$). Работа, затраченная на пластическую деформацию, может быть выше работы образования поверхности в $10 \div 10^3$ раз и, согласно современным представлениям, расходоваться на образование в твердом теле различного рода дефектов. Ребиндер предложил коэффициент полезного действия процесса измельчения выразить уравнением

$$\eta = \frac{A_{нов}}{A_{нов} + A_{пл} + A_{упр}}. \quad (5)$$

Этот коэффициент обычно не превышает 1%.

Теория разрушения материалов постоянно развивается. В ряде работ [11, 12] отрицается наличие пластической деформации, предшествующей разрушению. Указывается, что при нагружении тело сохраняет свойство линейной упругости вплоть до разрушения. Такая точка зрения имеет право на жизнь, что объясняется наличием так называемых силовых трещин. Однако механизм образования таких трещин пока не ясен.

Энергетический подход к оценке свойств горных пород реализован в работе [13]. Оценку физико-механических свойств пород, ответственных за энергетическое разрушения и диспергирования, предлагается проводить на основе компонент плотности энергии, характеризующих различные стадии допредельного и предельного деформирования. Удельную энергию на образование единицы поверхности предлагается рассчитывать по величине энергии, накопленной в единице объема трещинного заполнителя (трещинных пустот). Удельную энергию для акта саморазрушения, авторы рассматривали как теоретическую оценку удельной поверхностной энергии, т.е. природной энергетической характеристики вещества, дающей представление о генетической способности породы к образованию новой поверхности — к диспергированию. Недостатком этой ме-

тодики является использование опытных данных для определения некоторых параметров разрушения ввиду невозможности их аналитического получения.

К сожалению, теоретические работы по моделям разрушения мало используются на практике для повышения эффективности процессов диспергирования, что еще раз подтверждает сложность и слабую изученность этих процессов. Поэтому особый интерес представляют работы практической направленности.

Для определения величины минимальной работы, необходимой для измельчения, существуют специальные методы. Одним из них является метод свободного дробления, который разработан Кэри и Стайрмандом [14]. Суть его в следующем: предполагается, что разрушение отдельной частицы может быть произведено с минимальными затратами энергии, когда она измельчается без контакта с другими частицами (т.е. без затрат на трение) и использования мельющих тел (без затрат на их трение и деформацию). Стайрмандом реализован метод так называемого свободного дробления. Он заключается в том, что дробление осуществлялось раздавливанием слоя определенного размера толщиной в одну частицу под прессом между двумя плоскими поверхностями. Зная силу воздействия и путь продвижения сдавливающей плоскости, можно определить удельный расход энергии на измельчение данного материала от исходного размера частиц до конечного.

Стайрманд, используя этот метод, провел сравнение энергетической эффективности ряда промышленных измельчителей с различными типами воздействия на измельчаемый материал. Анализ полученных результатов привел к выводу, что известные мельницы в основном далеки от реально достижимого предела энергетической эффективности. Этот показатель возможно увеличить в 5–10 раз. Для этого необходимо выполнение как минимум двух условий:

- 1) мельница должна измельчать в условиях, максимально приближенных к свободному дроблению;
- 2) полученный продукт необходимо немедленно удалять из зоны измельчения.

Только при этом будут сведены к минимуму потери энергии, связанные с взаимодействием частиц между собой. Исходя из этого, можно сделать вывод, что наиболее эффективны аппараты, приближающиеся по типу воздействия к свободному дроблению, например валковые дробилки и мельницы. А комбинация свободного дробления с замкнутым циклом работы возможна только в шарово-тарельчатой мельнице.

В реальных промышленных условиях принцип свободного дробления может нарушаться. Из-за неравномерности подачи материала под валки, не оптимальной величины частоты вращения тарелки перед валками высота слоя материала может повышаться и значительно превышать диаметр наибольшей частицы в исходном продукте.

Для оценки влияния высоты слоя на энергозатраты нами использована модель разрушения в слое. Процесс разрушения "в слое" можно интерпретировать

является отдельный акт нагружения слоя породы между двумя плоскостями до предельного состояния, т. е. достижения предельной деформации. При нагружении плотность энергии деформаций изменяется от нуля до некоторого окончательного значения. Взаимосвязь между плотностью энергии деформации и деформацией слоя определялась из рассмотрения баланса энергии. При создании модели разрушения было принято допущение, что при сжатии слоя практически не изменяется объем твердой фазы, то есть объем слоя меняется в основном за счет заполнения воздушных промежутков.

При составлении модели разрушения материала в слое в качестве показателей упругопластических и структурных свойств слоя материала приняты плотность слоя, определяемая относительным содержанием твердого в объеме слоя или коэффициентом разрыхления материала, плотность энергии упругих деформаций слоя (удельная энергия деформаций, отнесенная к объему слоя).

Показатель A_d характеризует упругопластические свойства слоя материала и определяется по зависимости

$$A_d = p^2 / (2 \cdot E_{эф}) = 0,5 \cdot \varepsilon^2 \cdot E_{эф}, \quad (6)$$

где p – среднее давление в слое материала;

ε – относительная деформация слоя;

$E_{эф}$ – эффективный модуль упругости, зависящий от объемного содержания твердого.

$$E_{эф} = E_n / (1 - (\varepsilon / \varepsilon_{np}))^k, \quad (7)$$

где E_n – модуль насыпной сжимаемости материала;

ε_{np} – предельное значение относительной деформации;

k – коэффициент, зависящий от упругопластических свойств деформируемого слоя и его структуры.

При уменьшении толщины слоя на величину Δh энергетический баланс (баланс сохранения энергии) может быть описан следующим уравнением (для плотности энергии):

$$p \Delta h = h_0 \vartheta_0 \Delta (A_s + A_d), \quad (8)$$

где h_0 – исходная толщина слоя;

ϑ_0 – исходное содержание твердого в слое (в относительных единицах);

A_s – удельная поверхностная энергия на единицу объема материала.

Уравнение (8) определяет жесткость слоя, т.е. значение силы, деформирующей слой на величину Δh , которое можно также записать в виде

$$p \varepsilon = \vartheta_0 \cdot \Delta (A_s + A_d), \quad (9)$$

где $\varepsilon = (\Delta h / h_0)$ – относительная деформация.

Смысл уравнения (12) с точки зрения физики процесса состоит в том, что работа внешней силы (левая часть уравнения) идет на накопление энергии деформирования ΔA_d и на изменение поверхностной энергии ΔA_s . Все величины здесь относятся к единице объема материала.

Энергозатраты на разрушение слоя (при линейном законе изменения нагрузки F) составят

$$A_F = 0,5 \cdot F \cdot \Delta h, \quad (10)$$

где Δh – деформация слоя.

Тогда удельные энергозатраты на разрушение слоя

$$A_{уд} = A_F / V = 0,5 \cdot F \cdot \Delta h / (S H) = 0,5 \cdot p \cdot \varepsilon, \quad (11)$$

где V – объем слоя;

S – площадь поперечного сечения слоя;

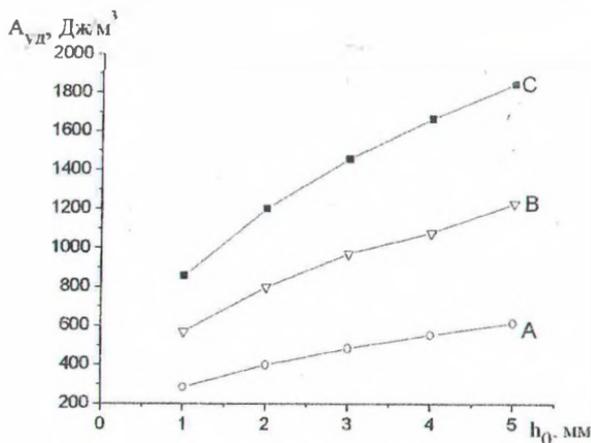
H – высота слоя;

F – сжимающая сила.

После преобразований получаем

$$A_{уд} = 0,5 \cdot \varepsilon^2 \cdot E_{эф} / (1 - (\varepsilon / \varepsilon_{пр}))^k. \quad (12)$$

Промежуточная формула (11) модели разрушения использована для оценки влияния высоты слоя на удельные энергозатраты на измельчение гипсового камня в экспериментальной валковой мельницы. Размеры размольного вала: средний диаметр – 150 мм; ширина – 50 мм. При расчетах варьировалось давление прижатия валков от 15 МПа до 45 МПа, толщина слоя – в диапазоне 1–5 мм. По полученным данным была построена графическая зависимость (рис. 1) изменения удельной работы разрушения от величины толщины слоя материала.



$\sigma_{сж}$ соответственно: А – 15 МПа; В – 30 МПа; С – 45 МПа.

Рисунок 1 – Изменение удельной работы разрушения от толщины слоя при различном приложенном давлении

Расчеты показывают, что с увеличением высоты слоя значительно возрастают удельные энергозатраты. Особенно это заметно при высоких давлениях ($\sigma_{сж} = 45$ МПа). Поэтому важнейшей задачей дальнейших исследований является оптимизация технологических и конструктивных параметров мельницы для

поддержания минимальной высоты слоя равной диаметру размалываемых час-

Экспериментальные исследования по измельчению цементного клинкера в валково-тарельчатой мельнице.

Как уже говорилось ранее, валково-тарельчатые мельницы работают в циклическом режиме с воздушным проходным сепаратором. Все немногочисленные исследования среднеходных мельниц основывались на работе помольного агрегата в комплексе с классификатором. Для выявления особенностей процесса помола в валково-тарельчатой мельнице без классифицирующего устройства были проведены исследования по размолу цементного клинкера при различном количестве циклов воздействия на материал. Экспериментальная установка, помимо собственно мельницы (рис. 2), включала в себя питатель, газодувку и ручной фильтр. В качестве размалываемого материала был взят цементный клинкер с размером фракции 3-5 мм. Эксперименты проводились при постоянном усилии нажатия валков на слой материала (8 кН) и частоты вращения разнотарельчатой тарелки (80 об/мин). Количество циклов воздействия на материал изменялось в диапазоне от 1 до 11, т.е. материал пропускался между валками и тарелкой без последующего отделения мелкой фракции (без классификации).

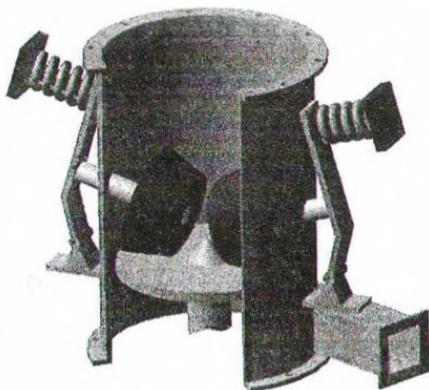


Рисунок 2 – Экспериментальная валково-тарельчатая мельница

Готовый порошок подвергался ситовому анализу на аналитической промывающей машине *Retsch*. По результатам отсева были построены суммарные характеристики крупности по плюсу полученного продукта для различных циклов воздействия, представленные на рис. 3.

Из полученной зависимости видно, что при однократном воздействии полученный материал имеет довольно грубую дисперсность (количество частиц размером более 100 мкм составляет около 55 %). При увеличении циклов воздействия от трех до восьми дисперсность продукта изменяется мало. При дальнейшем увеличении циклов до одиннадцати дисперсность продукта снова

уменьшается и количество частиц размером более 100 мкм составляет менее 30 %.

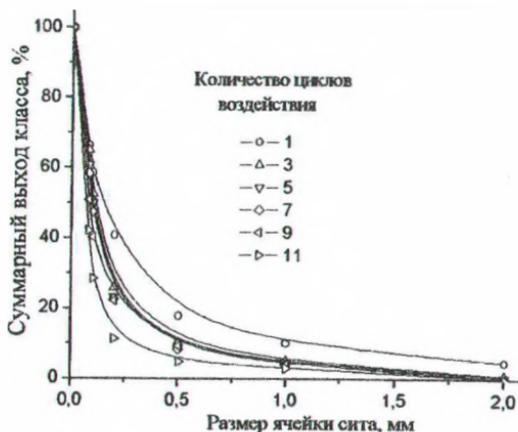


Рисунок 3 – Суммарные характеристики крупности измельченного клинкера

Более наглядное представление о влиянии количества циклов измельчения на тонину полученного порошка можно получить по его удельной поверхности. Для этого на приборе ПСХ-8 методом воздухопроницаемости были измерены удельные поверхности для каждой пробы. Из полученной зависимости (рис. 4) отчетливо видно, что на начальном этапе наблюдается значительный прирост удельной поверхности. Далее ее увеличение замедляется, что связано с накоплением мелких частиц перед размольными валками, которые образуют слой, препятствующий нормальному доступу относительно крупных частиц в зону помола. Кроме того, этот период характеризуется переизмельчением некоторой части порошка, вследствие чего образуются агломераты, которые огрубляют полученный продукт. При дальнейшем увеличении циклов воздействия скорость прироста удельной поверхности повышается, что по нашему мнению обуславливается началом разрушения агломератов, из-за отсутствия крупной фракции в измельчаемой пробе. Также необходимо отметить, что в итоге получалось значительное количество очень мелкой фракции (около 15% частиц размером менее 20 мкм).

Анализ полученных результатов показывает, что необходимая удельная поверхность измельченного продукта для большинства технологий строительных материалов (в производстве цемента, гипса, тонкомолотой извести и т.д.) она находится в диапазоне 2500-3500 см²/г) достигается уже при 4-6-и кратном воздействии. При дальнейшем увеличении циклов воздействия прирост удельной поверхности значительно снижается. Так при четырехкратном воздействии удельная поверхность порошка равна 3200 см²/г, а при восьмикратном –

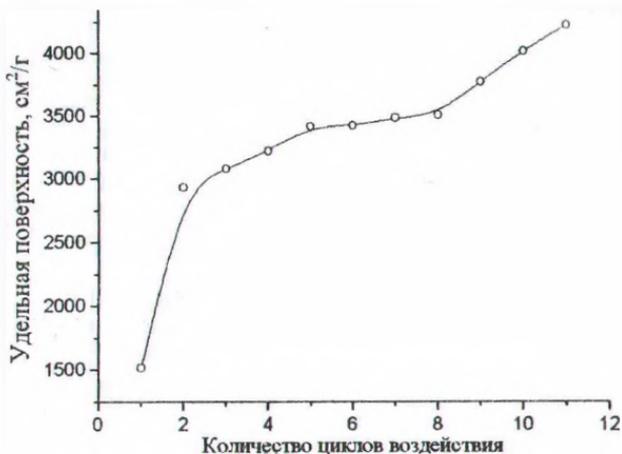


Рисунок 4 – Влияние количества циклов измельчения материала на удельную поверхность клинкерного порошка

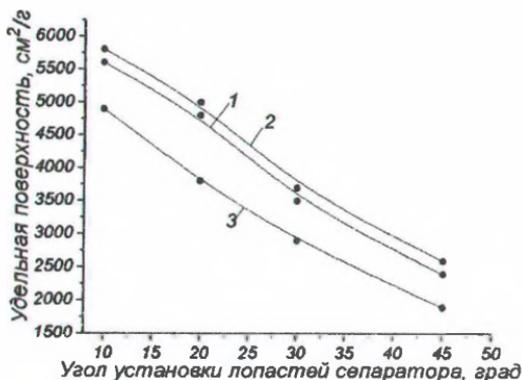
1400 см²/г, т.е. прирост составил менее 10%. Это объясняется увеличением в продукте мелких частиц, забирающих значительную часть подведенной энергии. При этом кроме снижения эффективности помола, существенно возрастают удельные энергозатраты на помол. Известно, что для снижения энергозатрат и повышения эффективности процесса помола необходимо продукты измельчения, не задерживая в рабочей зоне, постоянно выводить из мельницы. Однако удалить из зоны помола только мелкие частицы, соответствующие размерам готового продукта, практически невозможно, и поэтому в удаляемом из мельницы материале всегда будут находиться и более крупные частицы, которые необходимо выделить из общей массы и снова направить в мельницу для дополнительного помола. Такой принцип работы измельчителя называется замкнутым циклом помола, и как уже говорилось ранее, успешно реализуется в валковых мельницах. Таким образом, результаты экспериментов подтверждают технологическую и экономическую нецелесообразность использования валково-гарельчатых мельниц для работы в открытом цикле без сепаратора.

Далее были проведены экспериментальные исследования по помолу цементного клинкера в мельнице с воздушным проходным центробежным сепаратором [15].

Для проведения исследований нами была сконструирована и изготовлена экспериментальная установка, включающая: валковую мельницу с воздушным проходным сепаратором (с регулируемым углом установки лопастей), центробежную газодувку, рукавный фильтр, контрольно-измерительные приборы. В процессе опытов изменялась среднерасходная скорость газа в мельнице, частота вращения тарелки, усилие прижатия валков. В качестве измельчаемого материала использовался цементный клинкер фракции 3–5 мм. При варьировании

указанных выше параметров замерялись силовые характеристики привода мельницы, гидравлическое сопротивление и тонина помола.

На рис. 5 показано изменение удельной поверхности готового продукта в зависимости от угла установки лопастей сепаратора при разных скоростях газового потока.

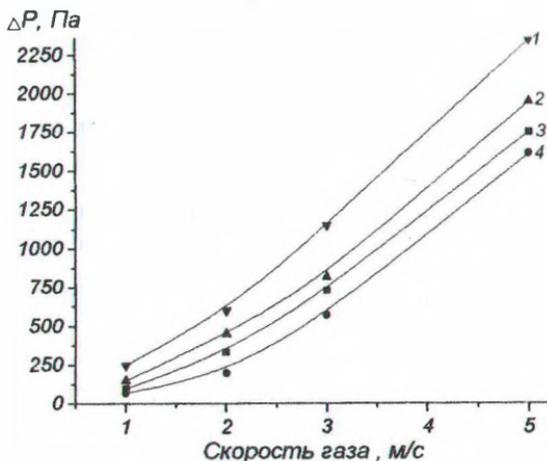


1 – $v=1$ м/с; 2 – $v=2$ м/с; 3 – $v=3$ м/с.

Рисунок 5 – Зависимость удельной поверхности готового продукта от угла открытия лопастей сепаратора

Здесь просматривается резкое снижение удельной поверхности при увеличении угла при всех скоростях. Приемлемую для производственных условий удельную поверхность 2500–3500 $\text{см}^2/\text{г}$ можно получить при угле установки лопастей 30–35°. Из полученной зависимости видно, что наиболее мелкий продукт получается при среднерасходной скорости газа по сечению мельницы 2 м/с. Кроме того, полученные данные показывают большие возможности сепаратора по регулированию тонины помола. При небольших углах установки лопастей удельную поверхность можно довести до 5000–6000 $\text{см}^2/\text{г}$.

Полные энергозатраты на помол в валково-тарельчатых мельницах складываются из затрат на пневмовыгрузку готового продукта и из энергозатрат на привод размольных валков и тарелки. Для оценки расхода электроэнергии на пневмотранспорт измельченного материала и готового продукта было проведено измерение гидравлического сопротивления помольного агрегата. Оно складывается из потерь напора газового потока на продувку непосредственно мельницы и потерь в сепараторе. На рис. 6 показано изменение гидравлического сопротивления мельницы от скорости воздушного потока. Видно, что при рабочих параметрах агрегата (скорость газа на сечение мельницы 1–3 м/с, угол открытия лопастей сепаратора 20–30 градусов), потери напора относительно невелики, и не превышают 1000 Па.



1 – $\gamma=10^\circ$; 2 – $\gamma=20^\circ$; 3 – $\gamma=30^\circ$; 4 – $\gamma=45^\circ$.

Рисунок 6 – Зависимость гидравлического сопротивления мельницы от скорости воздушного потока

Мощность привода помольного узла зависит от ряда факторов, таких как усилие прижатия валков, частота вращения тарелки, степень загрузки мельницы и т.д. Целью первоначальных опытов было определение влияния частоты вращения размольной тарелки на потребляемую мощность привода. Исследования проводились на холостом ходу и в рабочем режиме при постоянном давлении прижатия валков 4,5 МПа, рассчитанном из условия разрушения слоя материала с учетом коэффициента разрыхления. Результаты измерения мощности представлены на рис. 7. Проанализировав полученную зависимость, можно отметить, что на холостом ходу мощность привода мельницы возрастает с увеличением угловой скорости тарелки почти по линейному закону. В рабочем режиме наблюдается скачок потребляемой мощности при увеличении угловой скорости более 10 рад/с. Это связано с ростом центробежной силы, действующей на материал. При этом происходит увеличение скорости движения материала, который за счет торможения валками накапливается перед ними. Высота преодолеваемого валками слоя возрастает, а, соответственно, повышается и мощность на его преодоление. Этого допускать нельзя, так как часть исходного продукта вообще может не попасть под валки, и мельница перейдет в неэффективный режим работы. Необходимо отметить, что оптимальная частота вращения размольной тарелки (из условия гарантированного попадания материала под валки), полученная при исследовании мельницы ранее, находилась в диапазоне 80–100 об/мин.

После определения мощности привода размольного органа можно определить общие энергозатраты на проведение процесса помола в валковых среднеходных мельницах. Поскольку затраты мощности на подачу материала (привод

питателя) в мельницу невелики, то преобладающее значение имеет мощность привода размольной тарелки и мощность вентиляторной установки. При оптимальной частоте вращения мощность привода размольной тарелки составляет примерно 1500 Вт (рис. 7). Мощность вентиляторной установки можно рассчитать по гидравлическому сопротивлению мельницы. С учетом того, что при оптимальных скоростях газа по сечению мельницы гидравлическое сопротивление всего помольного агрегата не превышает 1000 Па, мощность привода вентилятора составит около 500 Вт. Таким образом, удельные энергозатраты (отнесенные к массе получаемого продукта) на процесс помола в исследуемой валковой мельнице не превышают 10 кВт ч/т (без учета системы аспирации). Полученные данные близкие к реальным, фиксируемых в промышленных условиях по данным зарубежных предприятий, что свидетельствует о достоверности полученных результатов и еще раз подтверждает факт значительного снижения энергозатрат (по сравнению с барабанными) при переходе на данный тип мельниц.

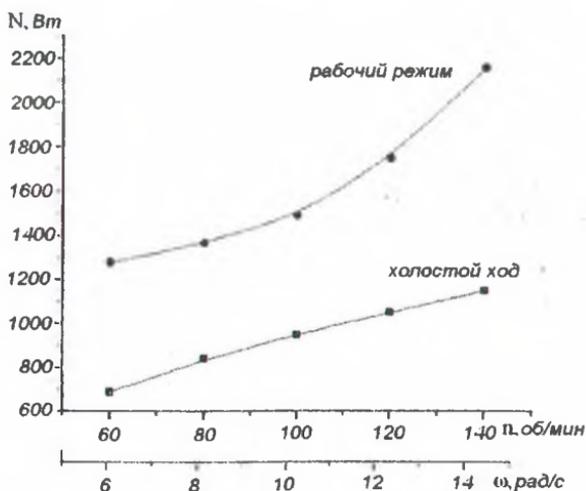
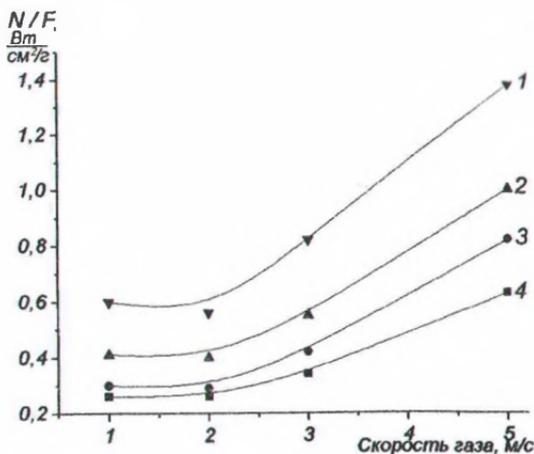


Рисунок 7 – Влияние частоты вращения тарелки на мощность привода

Используя значения мощности помольного агрегата и опытные данные по удельной поверхности готового продукта, можно построить графическую зависимость изменения удельных энергозатрат от скорости воздушного потока (рис. 8).

Причем, под удельными понимались энергозатраты на единицу удельной поверхности N/F . Логично было бы предположить, что наиболее энергетически выгодным был бы режим работы мельницы при максимальном угле открытия



1 - $\gamma=45^\circ$; 2 - $\gamma=30^\circ$; 3 - $\gamma=20^\circ$; 4 - $\gamma=10^\circ$

Рисунок 8 - Удельные энергозатраты мельницы

воластей (при прочих равных условиях). Однако полученные данные свидетельствуют об обратном, что связано со значительным уменьшением удельной поверхности готового продукта в таких условиях работы. Поэтому при выборе рабочих параметров необходимо учитывать максимально возможное количество факторов для получения оптимального режима работы мельницы. Кроме того, на полученной зависимости просматривается оптимальное значение скорости газового потока, при котором удельные энергозатраты (на единицу получаемой поверхности) минимальны.

Заключение

В работе сделан анализ научных исследований по теории разрушения хрупких материалов. Установлено, что сведения по этому процессу довольно противоречивы, нет обобщающих зависимостей, пригодных для практических расчетов. Все это объясняется сложностью и многофакторностью процесса разрушения материалов. Поэтому за основу были взяты исследования с явной практической направленностью, в частности по свободному дроблению в совокупности с замкнутым циклом работы помольных агрегатов. Доказана энергоэффективность этого способа и возможность его реализации в валково-тарельчатых мельницах. Предложена аналитическая модель измельчения в слое, расчеты по которой показали нецелесообразность эффективного увеличения высоты слоя материала под валками. Проведены экспериментальные исследования валково-тарельчатой мельницы, которые показали целесообразность ее использования только при организации замкнутого цикла с воздушным сепаратором. Подтверждена высокая эффективность и низкие энергозатраты при помоле материалов в такой мельнице, определены некоторые ее оптимальные параметры.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Роже, Г. Проблема измельчения материалов и ее развитие / Г. Роже // М.: Стройиздат, 1974. – 225 с.
2. Ревнивцев, А.М. Селективное разрушение материалов / А.М. Ревнивцев // М.: Недра, 1988. – 286 с.
3. Маркаў, У.А. Працэсы і апараты хімічнай тэхналогіі. Ч. I Гідрамеханічныя і механічныя працэсы / У.А. Маркаў, П.Я. Вайцяховіч // Мінск.: БДТУ, 2002. – 302 с.
4. Молчанов, В.И. Активация минералов при измельчении / В.И. Молчанов, О.Г. Селезнева, Е.Н. Жирнов. – М.: Недра, 1988. – 208 с.
5. Аввакумов, Е.Г. Механические методы активации химических процессов / Е.Г. Аввакумов. – Новосибирск: Наука, 1986. – 305 с.
6. Еремин, Н.Ф. Процессы и аппараты в технологии строительных материалов / Н.Ф. Еремин. – М.: Высшая школа, 1986. – 280 с.
7. Оспанов, А.А., Тлегенов, Ш.К. Основы эффективного измельчения в механике разрушения / А.А. Оспанов, Ш.К. Тлегенов. – Алматы, 2000. – 107 с.
8. Екобори, Т. Физика и механика разрушения и прочности твердых тел / Т. Екобори. – М.: Металлургия, 1971. – 264 с.
9. Финкель, В.М. Физические основы торможения разрушения / В.М. Финкель. – М.: Металлургия, 1977. – 329 с.
10. Ребиндер, П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Коллоидная химия: Избранные труды / П.А. Ребиндер. – М.: Наука, 1978. – 365 с.
11. Ключанов, А.В. Исследование механических характеристик хрупких тел при испытании на сжатие / А.В. Ключанов // Вестник СамГУ – Естественнонаучная серия. – 2006. – №4(44). – С. 58–65.
12. Александров, П.Е. О системе механических характеристик хрупких материалов / П.Е. Александров, В.М. Комов, П.Г. Комохов // Труды ЛИИЖТ. 1977. – №407. – С. 20–29.
13. Горобец, Л.Ж. Оценка энергетических параметров горных пород на стадии саморазрушения / Л.Ж. Горобец, С.Б. Дуброва // Деформирование и разрушение горных пород. Бишкек: Илим. – 1990. – С.350–358.
14. Stairmand, C. The energy efficiency of milling processes. A review of some fundamental investigations and their application to mill design / C. Stairmand // In Zerkleinern (4 Europaischen Symposium), Dechema Monogr. Wissenschaft. Chemie 1976, Bd 79. – S. 1–17.
15. Вайтхович, П.Е. Исследования влияния рабочих параметров валковых мельниц на удельные энергозатраты / П.Е. Вайтхович, В.С. Францкевич // Строительная наука и техника. 2007. – №2. – С. 18–22.