

ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ

The analysis of a modern condition of the theory of decomposition is resulted and is shown, that as a result of theoretical researches quality indicators of process are certain only. On the basis of these researches the estimation of the factors influencing over-all power inputs of process of decomposition is given, and ways of their decrease are planned. Main routes of evolution of technics and production engineering of decomposition among which as the most perspective notes modelling and optimization are formulated.

Введение. Процессы измельчения находят очень широкое применение во многих отраслях промышленности. Ежегодно несколько миллиардов тонн различных материалов подлежит измельчению. При этом безвозвратно теряется из-за абразивного износа несколько миллионов тонн высококачественной стали. По разным источникам, до 10% производимой в мире электроэнергии затрачивается на процессы измельчения. Широкий спектр использования свидетельствует о том, что и измельчаемые материалы совершенно разные по своим характеристикам: плотности, прочности, твердости, абразивности. Свойства измельчаемых материалов оказывают влияние на конструктивные особенности технологических агрегатов. В настоящее время сложились основные тенденции в развитии измельчающего оборудования, но общим для них остаются высокие энергозатраты на проведение процесса, достигающие 50 кВт·ч/т и более. Единичная мощность отдельных агрегатов превышает 1 МВт. Поэтому во всем мире ведутся интенсивные поиски путей снижения энергозатрат на проведение процессов измельчения. Среди этих путей можно выделить два стратегических направления, которые, в общем, взаимосвязаны. Во-первых, ведется постоянное совершенствование организации технологического процесса измельчения и конструктивных схем измельчающего оборудования. Во-вторых, проводятся глубокие теоретические исследования по изучению механизма разрушения материалов, его энергетики, что в конечном итоге должно иметь выход на более энергоэффективные процессы и оборудование.

Основная часть. Выбор рационального способа измельчения материала возможен только на основе анализа механики их разрушения.

Классическая механика материалов и конструкций базируется на теориях Кулона и Мора. Однако анализ использования упомянутых теорий для оценки процесса дезинтеграции минералов привел к неутешительным выводам [1]. Предложенные критерии разрушения никак не связаны с внутренними процессами, происходящими в материале, игнорируют неоднородность последнего. Внешним проявлением этого является значительное отклонение расчетной и экспериментальной прочности (до 50%) при ис-

пытании образцов на растяжение. В связи с чем делается вывод о непригодности использования названных критериев прочности при растяжении. Кроме того, прочность как при растяжении, так и при сжатии, зависит от размеров образца и способа нагружения, например трехточечный и четырехточечный изгиб. Еще одним необъяснимым фактом служит явление дилатации – превышение объема образца над объемом, который он должен иметь в данном напряженном состоянии. И наконец, ни одна из рассмотренных теорий не дала ответа на вопрос, почему теоретическая прочность, рассчитанная на основе теории ионных кристаллов, оказалась на несколько порядков выше технической.

Ответы на эти вопросы нашел Гриффитс, предположивший, что любой, даже самый монолитный материал содержит в себе трещины и реальная прочность зависит в первую очередь от их наличия [2]. Трещина выступает своеобразным концентратором напряжений, в ней концентрируется упругая энергия. Когда трещина начинает развиваться, то часть упругой энергии разряжается и затрачивается на разрушение двух поверхностей трещины. Гриффитс впервые ввел понятие поверхностной энергии, которая пропорциональна площади вновь образованной поверхности.

Энергетический критерий прочности тела с трещиной первым сформулировал также Гриффитс. Он предположил, что трещина в напряженном теле с фиксированными границами начнет развиваться в тот момент, когда телу это станет энергетически «выгодно», а именно: когда уменьшение энергии деформации всего тела, произошедшее в результате раскрытия трещины, превысит энергию образованной при этом раскрытии поверхности. Математически указанный энергетический критерий предельного равновесия трещины выглядит следующим образом:

$$\frac{dW}{dS} = 2w, \quad (1)$$

где W – энергия деформации тела, внешние границы которого фиксированы; S – площадь

трещины; w – энергия образования единицы новой поверхности.

Однако теория Гриффитса, ответив на одни вопросы, поставила другие. Главный из них – невыясненность причин и механизмов зарождения трещин, их роста и движения. Ответ на некоторые из этих вопросов удалось получить только после возникновения теорий субмикроскопического уровня. Основная идеология этих теорий состоит в том, что материал рассматривается как дискретная среда.

Большинство измельчаемых материалов имеют кристаллическую структуру. Механические свойства кристаллов как совокупности многих частиц (атомов, ионов или молекул), образующих правильную решетку, определяются их составом, силами взаимодействия частиц, структурой кристалла и наличием в нем разного рода дефектов.

Дефекты в кристалле подразделяются на точечные и линейные. Точечные дефекты проявляются в виде перемещений атомов в пределах кристаллической решетки. Линейные дефекты – это дислокации, которые представляют собой смещение одной части кристалла относительно другой.

Несмотря на наличие в кристаллах точечных дефектов, основное влияние на зарождение и развитие трещин оказывают линейные дефекты – дислокации. Дислокации по толщине равны 5–6 атомам, а длина их примерно соответствует размеру кристаллов [3], т. е. может составить несколько миллиметров. Линейные дефекты, естественно, могут охватывать больше узлов кристаллической решетки, чем точечные. Значительно большая часть энергии дислокации делает ее практически независимой от температуры. Причины появления дислокаций довольно разнообразны. Во-первых, они возникают уже в процессе роста кристаллов из-за того, что отдельные их блоки непараллельные друг другу. Следовательно, при срастании образуется переходный слой со смещением кристаллической решетки. Во-вторых, источником дислокаций может быть и скопление точечных дефектов. Однако основная часть дислокации появляется на стадии пластической деформации. Необходимо было бы сказать наоборот, пластическая деформация является следствием наличия в материале дислокаций, которые могут перемещаться под действием малых напряжений и генерировать другие дислокации в процессе деформации.

В зависимости от поведения дислокаций материалы делятся на хрупкие, полухрупкие и пластичные.

Большинство горных пород, подвергаемых дезинтеграции, нельзя отнести к пластичным материалам. Поэтому ограничимся констатацией общеизвестного факта, что в пластичных

материалах создаются наилучшие условия для зарождения и развития дислокаций.

Вопрос о механизме разрушения хрупких материалов пока остается дискуссионным. Большинство авторов сходятся на том, что у хрупких материалов кристаллическая структура не претерпевает пластической деформации ни в какой форме, даже при напряжениях порядка теоретической прочности на отрыв. В них возникают так называемые силовые трещины, когда межатомные связи разрушаются как бы непосредственно под действием внешних механических усилий и одна атомная плоскость отрывается от другой.

Основную часть материалов, подвергаемых дезинтеграции, можно отнести к полухрупким. Они характеризуются наличием заметной подвижности дислокаций и отсутствием у них способности перемещаться из одной плоскости скольжения в другую. Закрытый рост трещин в полухрупких материалах не обязательно лавинообразный. Может наблюдаться торможение, и даже остановка трещины. Следовательно, процесс разрушения полухрупких материалов, его теоретическое описание более сложны, чем идеально хрупких и вязких. Это подтверждается работой [4]. В ней изучен рост и ветвление острых трещин в идеальном монокристалле, предлагается силовой и деформационный критерии. Указано, что при последовательном нагружении тела с трещиной реализуется такое напряженно-деформированное состояние, при котором выполняется либо силовой, либо деформационный критерий, а возможно и одновременное выполнение обоих. Имеет место конкуренция хрупкого и квази-хрупкого поведения материалов с вязким и квазивязким.

Таким образом, в этой работе на теоретическом уровне делается предположение о наличии пластической деформации и ее влиянии на хрупкое разрушение. Этот же факт подтвержден экспериментально при измельчении одного из самых хрупких минералов – кварца. Структурный анализ частиц кварца после измельчения показал, что поверхностный слой имеет не кристаллическую, а аморфную структуру. Толщина аморфизированного слоя в зависимости от условий дезинтеграции составляет 1–30 нм [5]. На этом основано предположение, что аморфный слой обусловлен пластической деформацией, возникающей перед фронтом трещины в момент ее распространения.

Несмотря на важность определения прочностных характеристик материала, все-таки главным вопросом процесса дезинтеграции остается установление количественной связи между гранулометрическим составом конечного продукта и энергоемкостью процесса. К сожалению, и это подчеркивается в работе [1], успехи

в этом направлении незначительны. Мы до сих пор продолжаем использовать гипотезы, высказанные полторы сотни лет тому назад Риттингером, Киком и чуть позже Бондом. С физической точки зрения, по мнению Ревнивцева [1], более корректна формула Ребиндера:

$$A = K_d D^3 + K_p D^2, \quad (2)$$

где K_d и K_p – коэффициенты пропорциональности; D – размер измельчаемого тела.

Ребиндер внес большой вклад в развитие энергетической оценки процессов диспергирования [6]. Развивая свою гипотезу (2) и рассматривая совокупность процессов при измельчении, он показал, что работа измельчения A складывается из работы упругой деформации A_y , работы пластической деформации $A_{пл}$, работы на образование новой поверхности A_n и работы на придание разделяющимся частям кинетической энергии A_k .

$$A = A_y + A_{пл} + A_n + A_k. \quad (3)$$

Развитие теории измельчения Ребиндера продолжил его ученик Ходаков [5, 7]. Он качественно и количественно оценил вклад в общие энергозатраты каждой составляющей уравнения (2) и учел ряд дополнительных факторов, влияющих на эти энергозатраты.

По поводу пластической деформации Ходаков дает следующее пояснение. Механическое разрушение твердых тел происходит при создании в нем упругих предельных напряжений, которые на конечной стадии разрушения неизбежно сопровождаются пластическими деформациями, забирающими на себя значительную долю работы внешних сил. Пластическому деформированию подвергаются тонкие, непосредственно прилегающие к поверхностям раскола, слои частиц. Следовательно, удельные (на единицу объема измельчаемого материала) затраты энергии на пластическое деформирование пропорциональны площади поверхности уже разрушенных частиц и возрастают пропорционально уменьшению их размеров, тогда как удельные затраты энергии на предельное упругое деформирование от дисперсности не зависят. Пластическое деформирование становится определяющим в балансе затрат энергии на измельчение частиц малых размеров даже весьма хрупких материалов типа кварца и корунда. Работа на пластическую деформацию при разрушении некоторых горных пород может составлять до 80% от общих энергозатрат. Причем, ее значение может быть выше работы образования новой поверхности в $10-10^3$ раза [7].

Значительная часть энергии затрачивается на трение между частицами в процессе измельчения. Трение является результатом механиче-

ского зацепления и молекулярного сцепления между поверхностями.

На основании высказанных выше положений Ходаков [7] вывел уравнение, связывающее затраты энергии на измельчение с дисперсностью готового продукта. За определяющий параметр принята энергия, сообщаемая единице объема разрушаемого тела, $-w_V$.

Приращение этой энергии за один акт воздействия предлагается рассчитывать по уравнению

$$dw_V = \frac{9be}{a_2} \frac{ds}{s} + \left(\frac{3b\beta_1 + w_T}{a_2} + w_S \right) ds - \frac{b\beta_1^2}{4a_2} s ds, \quad (4)$$

где b – объемный фактор; e – плотность энергии упругой деформации, Дж/м³; a_2 – коэффициент изменения поверхности; s – удельная поверхность, м²/м³; β – плотность энергии пластической деформации, предшествующей хрупкому разрушению, Дж/м³; w_T – поверхностная энергия сил трения, образования и разрушения агломератов, Дж/м²; w_S – свободная поверхностная энергия, Дж/м².

Особые сложности вызывает определение параметров β и w_T . По признанию автора, точная оценка величины β требует учета релаксаций напряжений, что экспериментально трудно выполнимо. Сравнивая значения плотности энергии упругой e и пластической β деформации автор делает вывод, что затраты энергии на пластическую деформацию на 3–4 порядка выше.

Поверхностную энергию сил трения w_T предлагается оценивать с использованием уравнения (4), задаваясь соответствующим коэффициентом трения, давлением, равным пределу прочности материала, и длиной перемещения частицы, не превышающей ее размера. В этом случае работа сил трения на 1–2 порядка меньше работы пластического деформирования. Другие же потери энергии (на разрушение агломератов), по-видимому (утверждение автора), меньше работы сил трения.

Таким образом, Ходакову впервые удалось строго математически описать процесс диспергирования с учетом упругой и пластической деформаций, трения между частицами, диссипации энергии при воздействии на мелкие частицы, то есть учесть максимально возможное количество факторов с точки зрения физики процесса. И хотя по уравнению Ходакова невозможно точно рассчитать энергозатраты на проведение процесса диспергирования, но оценить вклад каждого фактора в общие энергозатраты и наметить пути их снижения вполне реально.

Анализ тенденций развития науки и техники для диспергирования материалов дал возможность сформулировать направления интенсификации этого процесса. Таковыми, на наш взгляд, являются оптимизация процесса диспергирования на основе изучения теории разрушения, поиск новых более эффективных способов воздействия на материал, совершенствование организации технологического процесса, моделирование и оптимизация движения измельчаемого материала и рабочих органов машин в зоне воздействия, конструкционное совершенствование измельчающих машин. Конечная цель интенсификации – снижение энергозатрат на единицу вновь образуемой поверхности.

Ориентируясь на сформулированные направления интенсификации, проведем их краткий анализ.

С точки зрения теории разрушения следует отметить, что в процессе дезинтеграции имеют место определенные стадии, без которых он не может осуществиться. К таким стадиям относятся упругая и пластическая деформация, предшествующая разрушению. На них процесс можно только оптимизировать. Но вместе с тем из уравнения (4) видно, что некоторые стадии и связанные с ними энергозатраты вообще бесполезны и от них по возможности, надо избавляться. Таковыми являются пластическая деформация после достижения минимального критического размера, трение между частицами. Естественно, что придание осколкам разрушения излишней кинетической энергии также бессмысленно.

Детальный анализ путей снижения энергозатрат на каждой из стадий провел Ревнивцев [1]. Им указано, что на первой стадии главное избегать избыточной упругой деформации, накапливаемой в процессе нагружения и диссипирующей затем в тепло. Особенно это актуально для разрушения крупных кусков, где преобладает упругая деформация. В идеале, особенно на предварительных стадиях, следует нагружать не весь кусок, а создавать локальные высокоградиентные нагрузки в наиболее слабых местах, чтобы разрушить межкристаллические связи. В этом плане перспективным следует считать многоцикловое сжимающее воздействие с небольшой деформацией [8] или ударное воздействие. Эксперименты по ударному селективному разрушению калийных руд [9] подтвердили это предположение. Основной путь снижения затрат на пластическую деформацию при разрушении минералов состоит в подборе оптимального соотношения между прилагаемой нагрузкой, скоростью деформирования и продолжительностью нагружения [1]. Таким образом, снижение затрат на упругую и пластическую деформацию возможно только на основе детального изучения процесса, выбора

рационального способа воздействия и оптимизации нагружения.

Как указывалось ранее [7], значительная часть энергии затрачивается на преодоление трения между частицами в зоне разрушения. На основе теоретического анализа определена доля энергии, затрачиваемой на трение. Одновременно проводились экспериментальные исследования по учету влияния трения между частицами на общие энергозатраты процесса диспергирования. Такие эксперименты начаты Кэри и продолжены Стайрмандом [10]. Причем исследования проводились в обратной постановке: в идеализированных условиях при полном отсутствии трения между частицами. Практически это осуществлялось таким образом, что между плитами пресса укладывался слой частиц определенного размера без взаимного контакта. В процессе раздавливания этого монослоя определялась удельная энергоемкость разрушения. Такой метод разрушения получил название «свободное дробление». Далее, используя данный метод, Стайрманд проанализировал процесс измельчения в ряде промышленных агрегатов с разным типом воздействия и пришел к выводу, что наиболее энергоэффективными являются агрегаты, приближающиеся по типу воздействия к «свободному дроблению». В этом случае взаимодействие между частицами и потери энергии на трение сведены к минимуму. Одной из причин увеличения взаимных контактов и трения между частицами является накопление мелких частиц в зоне разрушения, на что обращалось внимание в работах [1, 7]. Причем, пока частицы не достигли минимального критического размера, энергия затрачивается только на трение. При увеличении в зоне разрушения доли частиц с размером меньше критического значительная часть энергии расходуется на их пластическую деформацию, которая с точки зрения диспергирования бесполезна и не приводит к увеличению удельной поверхности. Опыты Шонерта [11] по измельчению частиц разных размеров имели более практическую направленность и подтвердили теоретические предположения. Им установлено, что по мере накопления мелкой фракции в ходе измельчения растет число контактов между частицами и при общей прежней нагрузке, уменьшаются контактные силы до пределов ниже разрушающих нагрузок для крупных частиц, увеличивается диссипация энергии. Подводя итог, можно сделать вывод, что для снижения затрат энергии на трение и пластическую деформацию после достижения минимального критического размера частиц необходимо выполнение двух требований: измельчающий агрегат должен работать в условиях, приближенных к «свободному дроблению», мелкая фракция должна немедленно удаляться

из зоны измельчения. Этому требованию в большей степени отвечают валковые измельчители раздавливающего типа, особенно с пневматической выгрузкой.

Анализ направлений снижения энергозатрат при диспергировании оставляет нам два основных способа воздействия на материал: удар и раздавливание в условиях «свободного дробления» и напроць исключает истирание, которое превалирует в некоторых измельчающих агрегатах, например барабанных мельницах. На наш взгляд, не стоит быть столь категоричными. Такой способ воздействия как истирание может использоваться на стадии механической активации и для получения наночастиц, о чем свидетельствуют исследования последних лет [12].

Возвращаясь непосредственно к процессу диспергирования, интересно оценить и сравнить два приоритетных способа воздействия: удар и раздавливание. Сведения по этому поводу довольно противоречивы, каждый исследователь отстаивает свою точку зрения.

Наиболее категоричными следует считать данные исследований Румфа [13]. Он сравнивал энергозатраты при измельчении цементного клинкера методом «индивидуального зерна», близким к методу «свободного дробления», и свободным ударом. В результате расход энергии на разрушение частиц до поверхности $0,3 \text{ м}^2/\text{г}$ при раздавливании получился в пределах $2,5 \div 5,8 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}$, а при ударе на порядок выше – $23 \div 53 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}$, что сравнимо с шаровой мельницей ($32 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}$). Менее категоричные данные приведены в монографии Ходакова [7] со ссылкой на исследования зарубежных авторов (рис. 1).

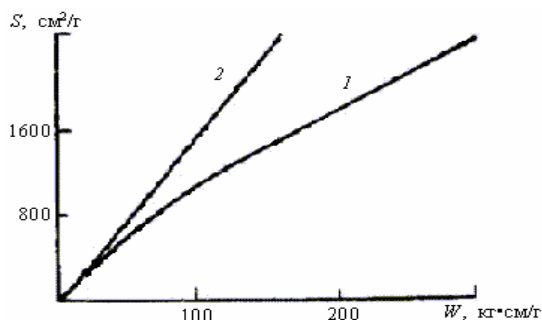


Рис. 1. Измельчение кварцевого песка ударом (1) и сжатием (2)

Сравнение энергоемкости измельчения кварцевого песка ударом и сжатием показывает, что в области дисперсности, превышающей $800 \text{ см}^2/\text{г}$, сжатие – более экономичный способ воздействия, а при разрушении сравнительно крупных частиц их эффективность одинакова. Эта дискуссия на теоретическом уровне и уровне идеализированного эксперимента может быть бесконечной.

Поэтому обратимся к производственному опыту эксплуатации агрегатов раздавливающего и ударного действия.

Каждый агрегат имеет свои преимущества и недостатки по механизму воздействия на материал и его разрушению. Но реальное конструктивное оформление агрегатов порождает новые преимущества и недостатки каждого из них. Для сравнения нами выбраны два агрегата: молотковая мельница ударного и валковая раздавливающего действия. Обе работают с пневматическим удалением материала из зоны воздействия. Удельные энергозатраты при помоле угля до тонины $R_{90} = 8\%$ в валковой мельнице составляют $13,5 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}$ [14] с учетом затрат на классификацию и пневмотранспорт готового продукта. Удельные затраты при помоле того же материала в молотковой мельнице в зависимости от разной тонины R_{90} , взятые из работы [15], приведены на графике (рис. 2).

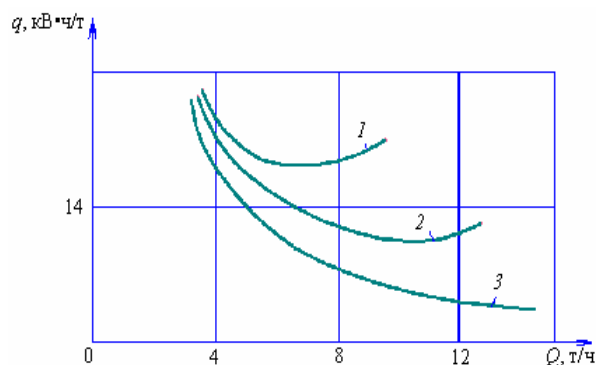


Рис. 2. Зависимость удельных энергозатрат от производительности при помоле угля в молотковой мельнице:
1 – $R_{90} = 20\%$; 2 – $R_{90} = 27\%$; 3 – $R_{90} = 38\%$

Анализ этих данных показывает, что удельные энергозатраты на диспергирование в агрегатах ударного и раздавливающего действия соизмеримы. Но одновременно выяснилось неоспоримое преимущество валковых. Так, износ рабочих органов у них составляет около $2,5 \text{ г}/\text{т}$ измельченного продукта [14], а у молотковых – около $200 \text{ г}/\text{т}$ [8]. Кроме того, скорость рабочего органа в агрегатах ударного действия значительно выше ($50\text{--}60 \text{ м}/\text{с}$) [15], что может привести к значительным динамическим нагрузкам, особенно при неравномерном износе рабочих органов. Именно это и предопределило более широкое использование валковых измельчителей в такой крупнотоннажной технологии, как производство цемента [14].

Несмотря на это, ударный способ воздействия имеет право на использование наравне с раздавливающим, а в отдельных случаях даже предпочтителен. Интерес к нему не ослабевает, что подтверждается исследованиями теоретического и прикладного характера [16, 17]. На

наш взгляд, ударное измельчение можно использовать в следующих случаях: грубый предварительный помол, заключающийся в создании высокоградиентных нагрузок и разрушении межкристаллических связей, что характерно для селективного измельчения минералов; измельчение мягких и волокнистых материалов преимущественно органического происхождения (полимеры, зерно, целлюлоза и т. д.); измельчение неабразивных материалов средней прочности в малотоннажных производствах, реализуемое в малогабаритных установках, для которых динамические нагрузки не являются определяющим фактором; механическая активация материалов, требующая значительной концентрации энергии для максимально быстрого доведения их до состояния пластической деформации.

Изменение организации процесса измельчения предопределено одним из важных теоретических выводов о необходимости постоянно и быстро удаления мелкой фракции из зоны разрушения. В современных измельчающих агрегатах мелкие частицы выносятся потоком воздуха. Причем для надежного их удаления скорость воздуха рассчитывается на вынос заведомо больших частиц. Затем проводится классификация, и мелкие частицы удаляются как готовый продукт, а крупные возвращаются в зону разрушения. Для реализации такой технологии требуется организация замкнутого цикла работы измельчающего агрегата. Преимущества замкнутого цикла очевидны и доказаны практикой. В работе [14] приведено сравнение энергозатрат при помоле клинкера в открытом и замкнутом циклах. Например, при остатке на контрольном сите 10% энергозатраты при замкнутом цикле в 1,4 раза ниже, чем при открытом, что не требует дальнейших комментариев.

В плане конструкционного совершенствования и с учетом того, что процесс диспергирования очень энергоемкий, основным направлением снижения энергоемкости следует считать более широкое использование агрегатов раздавливающего и ударного действия, работающих к тому же в замкнутом цикле. Вместе с тем и агрегаты комбинированного воздействия с истирающим эффектом имеют свою нишу. Они могут использоваться для сверхтонкого коллоидного измельчения, в нанотехнологиях.

Современные измельчающие машины основаны на принципе механического воздействия на материал. Однако этот способ воздействия в различных его вариациях в большей степени себя исчерпал. В связи с этим ведутся поиски новых более эффективных способов разрушения материалов. Особая перспектива в этом плане связана с применением различных физических эффектов для диспергирования мате-

риалов как в воздушной, так и в водной средах. Большинство описанных способов находятся в стадии доработки и не доведены пока до широкого применения в промышленности. Среди всех новых способов воздействия на разрушаемый материал подкупает своей простотой реализации кавитационный.

От появления новой идеи до ее практической реализации проходит достаточно продолжительный отрезок времени. Это обусловлено тем, что требуется экспериментальная проверка работоспособности нового технического решения, определение оптимальных режимов его работы в конкретном технологическом процессе.

При экспериментальной проверке измельчающих машин возникают большие трудности, связанные со спецификой измельчения. Модели машин и их составные части испытывают высокие нагрузки и поэтому должны быть изготовлены из соответствующих конструкционных материалов, обеспечивающих прочность, жесткость, износоустойчивость. Проведение экспериментов требует использования большого количества измельчаемых материалов, их подготовки и утилизации после пробного измельчения. Кроме того, по результатам экспериментов можно определить только обобщающие характеристики процесса. Особенности движения материала, сущность самого процесса изучить практически невозможно из-за недоступности зоны разрушения для установки контрольно-измерительной аппаратуры и визуального наблюдения. Поэтому мы не можем, например, определить условия соприкосновения материала с рабочим органом в мельницах ударного действия, траекторию движения измельченных частиц в среднеходных мельницах и т. д. Незнание промежуточных характеристик не дает возможности регулировать процесс и устанавливать его оптимальные параметры. Часто в результате такого ограниченного эксперимента, особенно для новых конструкций агрегатов, вообще не удается найти оптимальные режимы работы, и в целом интересные технические решения не доводятся до практической реализации.

Разрешить указанное противоречие можно с помощью моделирования, особенно математического. Правильно составленная математическая модель, учет всех силовых факторов позволяют достоверно описать процесс, избавить нас от трудоемкого эксперимента с неизбежными ошибками и неточностями. Моделирование дает возможность качественно и количественно оценить процесс, рассчитать технологические и конструкционные параметры машин. На основе моделирования составляются методики и алгоритмы расчета измельчающих машин. Но математическое моделирование – это прежде всего инструмент для поиска опти-

мального конструктивного решения. Оптимизация конструкции любой машины, в том числе и измельчающей, – вот конечная цель творческого процесса по созданию новых образцов техники. А все современные методы оптимизации базируются на математических моделях [18].

Заключение. В работе дан анализ современного состояния теории дезинтеграции. Отмечено, что теоретические модели дают только качественную характеристику процесса разрушения материалов. Хотя по этим моделям невозможно точно рассчитать энергозатраты процесса диспергирования, но оценить долю затрат на каждой стадии и наметить пути их снижения вполне реально. В результате теоретического анализа установлено два предпочтительных способа воздействия на разрушаемый материал: раздавливание и удар. Важным аспектом работы следует считать объективные сравнения этих двух способов. Исходя из теоретических предпосылок, сформулированы основные направления совершенствования техники и технологии дезинтеграции, одним из которых является моделирование, определены перспективы каждого из них. Указаны преимущества математического моделирования при исследовании процессов диспергирования и его определяющая роль в оптимизации технологических и конструктивных параметров измельчающих машин.

Литература

1. Селективное разрушение минералов / В. И. Ревнивцев [и др.]; под ред. В. И. Ревнивцева. – М.: Недра, 1988. – 286 с.
2. Аввакумов, Е. Г. Механические методы активации химических процессов / Е. Г. Аввакумов. – М.: Наука, 1986. – 305 с.
3. Финкель, В. М. Портрет трещины / В. М. Финкель. – М.: Металлургия, 1989. – 192 с.
4. Корнев, В. М. Разрушение хрупких и вязких кристаллов. Силовой и деформационный критерий / В. М. Корнев // Прикладная математика и механика. – 2003. – Т. 67, вып. 6. – С. 1027–1039.
5. Ходаков, Г. С. Тонкое измельчение строительных материалов / Г. С. Ходаков. – М.: Стройиздат, 1972. – 238 с.
6. Ребиндер, П. А. Физико-химическая механика дисперсных структур / П. А. Ребиндер. – М.: Наука, 1966. – 322 с.
7. Ходаков, Г. С. Физика измельчения / Г. С. Ходаков. – М.: Недра, 1972. – 308 с.
8. Сиденко, П. М. Измельчение в химической промышленности / П. М. Сиденко. – М.: Химия, 1977. – 368 с.
9. Левданский, Э. И. Совершенствование процесса измельчения силвинитовой руды перед флотацией / Э. И. Левданский, П. С. Гребенчук, А. Э. Левданский // Обогащение руд. – 2007. – № 3. – С. 3–7.
10. Stairmand, C. The energy efficiency of milling processes. A review of some fundamental investigations and their application to mill design / C. Stairmand // Zerkleinern: 4 Europaischen Symposium, Dechema Monogr. – Weinheim: Chemie. – 1976. – Bd. 79. – S. 1–17.
11. Schonert, J. Grenze der Zerkleinerung die kleinen Korngrößen / J. Schonert, K. Steier // Chemie – Ing. Techn. – 1979. – Jhrg. 43, № 13. – S. 773–777.
12. Geisler, R. Optimierter Einsatz von Ring-spaltkugelmuhler zur Nassvermahlung / R. Geisler // Chemie – Ing. Techn. – 2002. – Jhrg. 74, № 1–2. – S. 41–54.
13. Rumpf, H. Die Einzelkornzerkleinerung als Grundlage einer Zerkleinerung / H. Rumpf // Wissenschaft. Chemie – Ing. Techn. – 1965. – Jhrg. 37, № 3. – S. 187–202.
14. Дуда, В. Цемент / В. Дуда. – М.: Стройиздат, 1981. – 464 с.
15. Осокин, В. П. Молотковые мельницы / В. П. Осокин. – М.: Энергия, 1980. – 176 с.
16. Левданский, А. Э. Исследование ударно-центробежного измельчения материалов / А. Э. Левданский // Инж.-физ. журн. – 2004. – Т. 77, № 5. – С. 46–51.
17. Wei, J. Fracture mechanic of laminated glass subjected to blast loading / J. Wei, L. R. Dharamani // Teor. and Appl. Fract. Mech. – 2005. – Vol. 44, № 2. – P. 157–167.
18. Колесников, В. Л. Компьютерное моделирование и оптимизация химико-технологических систем / В. Л. Колесников, И. М. Жарский, П. П. Урбанович. – Минск: БГТУ, 2004. – 532 с.