

---

УДК 621.926

*Л. А. Сиваченко*

---

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ДЕЗИНТЕГРАТОРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

---

UDC 621.926

*L. A. Sivachenko*

---

## BASIC PRINCIPLES OF IMPROVING DISINTEGRATION TECHNOLOGIES

---

### **Аннотация**

Выполнен анализ методов повышения эффективности стадий измельчения. Обоснованы и предложены новые механизмы разрушения, показана их технологическая эффективность и обоснованы области применения.

### **Ключевые слова:**

измельчение, дезинтеграторные технологии, мельницы, развитие, концепция.

### **Abstract**

The paper analyzes the methods of increasing the efficiency of disintegration stages. New mechanisms of disintegration are substantiated and offered, their technological efficiency is shown, and spheres of their usage are justified.

### **Key words:**

disintegration, disintegration technologies, grinding mills, development, concept.

---

### ***Введение***

Межотраслевой анализ промышленного производства [1–5] показывает, что самой массовой и энергоемкой операцией является измельчение, которое осуществляется в агрегатах различной конструкции и которое для удобства целостного восприятия можно объединить под единым определением – дезинтеграторное [6–8]. В состав операции измельчения, кроме основного, измельчительно-го, входит также целый ряд вспомогательного оборудования – грохоты, смесители, грануляторы, питатели, дозаторы, флотомашинны, уплотнители, насосы и т. д., а также системы контроля и управления.

Целью настоящей работы является обоснование целесообразности создания и представления научно-техни-

ческой общественности новых механизмов измельчения твердых тел, являющихся основой проведения дезинтеграторных переделов. Предполагается, что они смогут найти широкое промышленное применение и быть основой проектирования технологических аппаратов повышенной эффективности.

### ***Концепция совершенствования дезинтеграторных технологий***

Резервы повышения эффективности измельчения и диспергирования материалов колоссальные. Это подтверждается целым рядом исследований [9–12]. Они основаны на хорошо известном факте, что в зависимости от структуры, типа химической связи, наличия пустот и дислокаций и их размеров свойства частиц материала изменя-

ются и требуют специальных подходов к обработке. Необходимы особые условия как для организации поведения перерабатываемой среды, так и для выполнения элементов рабочего оборудования.

Известно [13], что механические свойства минерального сырья при разных видах нагружения находятся в соотношении

$$\sigma_{сж} > \tau_{сдв} > \sigma_{изг} > \sigma_{раст}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{сж}$ ,  $\tau_{сдв}$ ,  $\sigma_{изг}$ ,  $\sigma_{раст}$  – прочности частиц на сжатие, сдвиг, изгиб и растяжение соответственно.

Соотношение этих показателей, например, для гранита, рознится до 20...30 раз, что предопределяет поиск новых способов измельчения, но связано с большими технологическими сложностями. Сегодня на практике в основном освоены такие методы, как сжатие и сдвиг, а также динамический метод – свободный удар.

Внедрение немеханических способов дезинтеграции материалов, например, электроимпульсного электрогидравлического, струйного, а также всех видов радиационных воздействий, связано с большими проблемами создания соответствующих генераторов и потерями при передаче и использовании энергии в рабочей среде [14–16].

Анализ исследований механизмов разрушения твердых тел показывает, что из всего их многообразия наибольшее применение имеют два: раздавливание и удар. По этой причине в измельчительных установках доминируют шаровые, валковые, конусные, роторные, молотковые и другие аппараты.

Основной прогресс в области прикладной механики разрушения основан на уменьшении затрат энергии на внешнее и внутреннее трение собственно процесса измельчения. В последние десятилетия в дезинтеграторных технологиях широкое распространение получают агрегаты для механоактивации и направ-

ленного изменения свойств перерабатываемого материала: селективное разрушение, механосинтез, управляемая тиксотропия структуры и др. [17]. Рассмотрим основные, на наш взгляд, методы интенсификации процессов разрушения.

### **Методы интенсификации процессов дезинтеграции**

1. Метод единичного зерна.
2. Метод рационального нагружения.
3. Метод рационализации размеров мелющих тел.
4. Метод замкнутого цикла.
5. Метод увеличения числа циклов воздействия.
6. Метод высокоскоростного нагружения или удара.
7. Метод адаптивности.
8. Метод самоизмельчения.
9. Метод селективности.
10. Метод вариативности.
11. Метод физико-химической обработки.
12. Метод управляемых колебаний.
13. Метод наложения инерционных сил.
14. Метод разупрочнения.
15. Метод изменения внешних условий.

**Метод 1. Воздействие на единичные частицы.** Такой подход является наиболее эффективным с энергетических позиций, хотя в чистом виде практически не реализован. Имеет огромный потенциал и будет постоянно развиваться. Важнейшая проблема его проведения – обеспечение управляемого движения обрабатываемых материалов.

**Метод 2. Рациональное нагружение.** В основу этого метода положено влияние различных способов нагружения на интенсивность и эффективность разрушения. Под эти условия проектируются и создаются измельчители различных типов.

**Метод 3. Минимизация размеров мелющих тел.** Это положение хорошо известно специалистам и находит самое

широкое применение в технике измельчения. Его физическая суть заключается в создании максимальных напряжений в структуре измельчаемого материала. Этот метод успешно реализуется, например, в бисерных и коллоидных мельницах. В настоящее время это одно из основных направлений повышения эффективности тонкого и особенно сверхтонкого измельчения.

**Метод 4. Замкнутый цикл работы помольных агрегатов.** Классическое определение этого метода – не измельчать лишнего. С этой целью работа измельчительных аппаратов организуется так, чтобы измельченный продукт не задерживался в рабочей камере, а удалялся из него, освобождая место для более крупного.

**Метод 5. Увеличение числа циклов воздействия.** Приложения этого метода следует рассматривать по нескольким направлениям. Во-первых, это чисто кинематическое форсирование процесса, во-вторых, создание условий, при которых каждая частица материала большее число раз испытывает внешнее силовое воздействие. Примерами этому могут служить конусно-инерционные дробилки, бисерные и вибрационные мельницы.

**Метод 6. Высокоскоростное нагружение или удар.** При таком подходе в разрушаемом материале создаются более высокие напряжения, приводящие к разрушению. За счет изменения параметров интенсивности приложения нагрузки можно управлять характеристиками получаемого продукта. Этот метод является одним из основных для механической активации твердых тел.

**Метод 7. Адаптивность работы.** Суть метода заключается в приспособленности рабочего оборудования к свойствам перерабатываемого материала, на изменение которых влияют влажность, крупность, прочность, наличие посторонних включений, структура материалов и т. д. Одним из вариантов реализации адаптивности может быть

применение упругодеформируемых рабочих органов и выполнение рабочего оборудования с дополнительными степенями движения исполнительных элементов.

**Метод 8. Самоизмельчение.** Идеология метода очень проста и заключается в том, что частицы материала разрушают друг друга под влиянием внешних сил, создаваемых ударом, сдвигом, центробежными полями и т. д. Спектр приложений метода очень широк и определяется требованиями технологий и условиями эксплуатации.

**Метод 9. Селективность.** Разрушение материала производится с учетом его физико-механических свойств, дефектности структуры, спайности её минеральных образований и ряда других. Проектирование таких измельчителей сопряжено с большими трудностями и требует серьезных научно-технологических наработок. Метод селективной дезинтеграции наиболее развит в рудоподготовке, но сейчас его применение чрезвычайно актуально для производства стройматериалов.

**Метод 10. Вариативность.** Применение подхода определяется изменчивостью как свойств перерабатываемых материалов, так и конструктивным исполнением рабочего оборудования, которое должно учитывать эти изменения. Попытки решить задачи измельчения в одну стадию, т. е. в одном аппарате, практически обречены либо связаны с большими проблемами.

**Метод 11. Физико-химическая обработка.** Здесь используются методы физико-химической механики, в частности, эффект Ребиндера, высокочастотная вибрация, ПАВ. Позволяет повысить эффективность дезинтеграции, но без интенсивного внешнего воздействия особых преимуществ не имеет.

**Метод 12. Управляемые колебания.** Есть много приложений этого метода, например, работа конусно-инерционных дробилок и вибромельниц. Большие перспективы в этом случае

связаны с резонансом, при реализации которого можно целенаправленно концентрировать ввод энергии в зонах разрушения.

**Метод 13. Наложение инерционных сил.** Преобладающим в этом случае является разрушение в поле сил инерции, например, в планетарных или ролико-маятниковых мельницах. При правильной его реализации достигается высокий технологический результат.

**Метод 14. Разупрочнение материала.** При определенных механических воздействиях в дополнении с другими внешними условиями в материале происходят изменения, приводящие к снижению его прочности и, следовательно, к более быстрому разрушению. Наибольшее применение этого метода связано с измельчением металлических материалов.

**Метод 15. Изменение внешних условий.** Это целый спектр самых разнообразных вариантов: охлаждение, в т. ч. посредством азота, нагрев, обработка в жидкой среде, вакуум, запаривание и др. Многообразие реализуемых в них механизмов разрушения требует их отдельного рассмотрения.

Перечисленные варианты интенсификации процессов измельчения являются далеко не полными, но даже простого их перечисления достаточно, чтобы оценить сложность выбора конкретного способа переработки того или иного материала с максимальной энергетической, технологической и экономической эффективностью. В связи с этим показателен опыт сравнения различных типов измельчителей. Попытка их объективной оценки была предпринята в 1993 г. в Одессе на одном из научных форумов, но реальных результатов она не принесла. Причина этого заключается в отсутствии как сформированной базы сравнения различных аппаратов, так и единого независимого центра, проводящего оценку действующего оборудования.

К значимым достижениям меха-

ники разрушения последних десятилетий относится разработка внутрислойного принудительного самоизмельчения или «измельчения в слое», осуществляемого между двумя валками под большим давлением [7, 8].

Однако коренного улучшения процесса, кроме вибрационного способа измельчения, реализованного отечественными специалистами в конусно-инерционных дробилках [7, 8], такой подход не дает. При этом видоизменяется конструкция машины, происходит переориентация дискретных нагрузений материала множеством мелющих тел на большеобъемное силовое воздействие, что в результате увеличивает нагрузку на рабочее оборудование и привод.

Множественность физико-механических и технологических свойств дисперсных материалов, подвергаемых различным видам обработки, требует создания таких видов воздействия на искомое сырье, которые обеспечили бы максимально необходимую степень переработки и максимальную эффективность при удовлетворении энергетических и эксплуатационных требований к технологическому оборудованию.

Все существующие методы воздействия на перерабатываемые материалы можно условно разделить на четыре основные группы:

- 1) переработка сырья жестко выполненными рабочими органами;
- 2) адаптивные, т. е. приспособляющиеся к свойствам перерабатываемой среды рабочими органами;
- 3) физические методы воздействия, например, электромагнитные, ультразвуковые, лазерные и т. д.;
- 4) химические методы, основанные на механизмах химической кинетики.

Научные интересы авторов затрагивают вторую группу. Естественно, возможен целый ряд решений, обеспечивающих адаптивность воздействия на среду. Коснемся только тех из них, которые связаны с новыми деформационными свойствами и повышенными ки-

нематематическими возможностями, в частности дополнительными степенями свободы движения рабочих звеньев и контактными взаимодействиями рабочих элементов.

### **Новые механизмы интенсификации процессов измельчения**

Предполагается создать новые механизмы интенсификации процессов измельчения на основе принципиально новой концепции использования адаптивных средств технологической вибротехники.

Под адаптивной переработкой будем понимать такой вид воздействия на материал, когда рабочие органы обеспечивают наибольшую технологическую эффективность и максимальную приспособленность к переработке материалов с любой степенью изменчивости их свойств. Высказанные положения приводят к выводу: одним из лучших средств адаптивной дезинтеграции может быть использование в качестве рабочих органов упругих кинематически деформируемых элементов или систем с избыточными связями – многошарнирных элементов.

Используемые рабочие органы на основе упругих элементов образуют большую группу аппаратов многоцелевого назначения: грохоты, смесители, дробилки, мельницы, диспергаторы, грануляторы, сушилки и т. д. В них рабочими телами являются пружины, стержни, рессоры, пластины, оболочки. Нами разработаны конструктивные решения этих аппаратов, методы расчета и их проектирование [4].

Расчет таких рабочих органов является очень сложной задачей, учитывающей не только всю сложность протекающих в процессах переработки материалов процессов, но и особенности поведения собственно рабочих элементов, испытывающих интенсивные колебания и знакопеременные нагрузки.

Адаптивные методы технологической переработки дисперсных материа-

лов, разработанные нашей научной школой, защищены 220 изобретениями и патентами в Беларуси, России, США, Франции, Швеции, Бразилии, Австралии и др. странах и представлены в 300 научных публикациях. На их основе изготовлено около 800 единиц технологического оборудования 60 типоразмеров и различных моделей [3, 4].

По мнению авторов, на основе вибрационного метода разрушения можно создать аппарат, способный заменить самую несовершенную машину – шаровую мельницу с КПД 0,6 % [1]. Сделать нечто подобное не только чрезвычайно сложно, но и жизненно необходимо. Страна, которая сможет это сделать первой, совершит промышленную революцию в технологии крупнотоннажных производств.

Интенсификация методов переработки минерального сырья, в том числе строительных материалов, может быть достигнута использованием в качестве мелющих тел стержней, рессор или волокон, приводимых в движение виброинерционным приводом.

Проведенные экспериментальные исследования стержневого и традиционного способов разрушения тонкого слоя материала показали несомненные преимущества нового способа.

Наглядное представление об эксперименте дают схемы, приведенные на рис. 1.

На рис. 1, а представлен вариант разрушения частиц материала между двумя плоскими поверхностями, на рис. 1, б – вариант разрушения частиц материала с одним рядом плотно уложенных стержней, размещенных между плоским основанием и нажимной пластиной, на рис. 1, в – вариант с двумя рядами стержней. Привод осуществляет только одно движение – осевое сжатие.

Для проверки правильности выдвинутых положений изготовлена необходимая оснастка и проведены исследования такого метода разрушения. Измельчали кварцевый песок и мрамор,

помещенный между двумя пластинами размером 50×50 мм на гидравлическом прессе МС-500 при усилии сжатия 250 кН. На рабочую поверхность ровным слоем насыпали кварцевый песок фракции 0,63...1,25 мм в количестве 5 г. Это соответствует средней толщине

песка ( $\approx 1,4$  мм), т. е. практически максимальной крупности частиц. Для исключения просыпания порции оснастки накрывались пластиной.

Иллюстрации этих методов разрушения представлены на рис. 2.

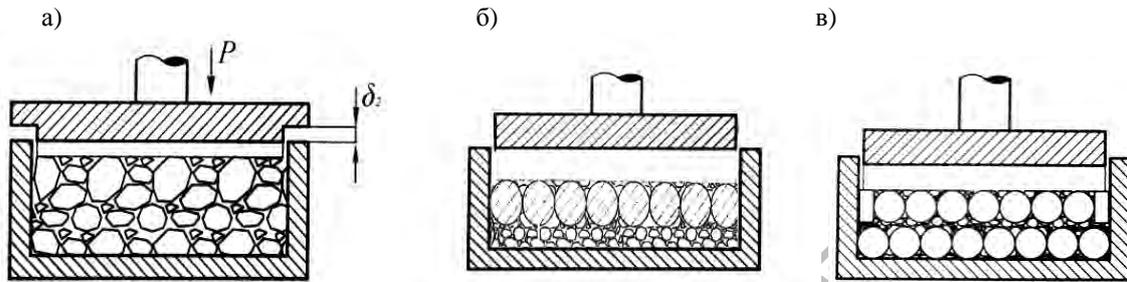


Рис. 1. Варианты элементарных актов нагружения при разрушении материала с помощью стержней



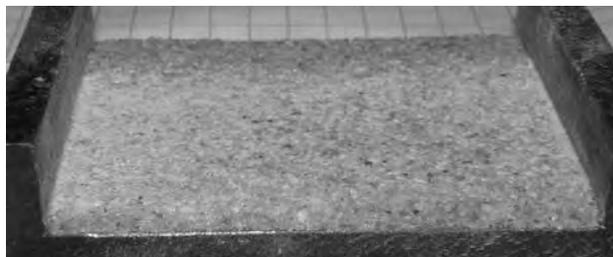
Рис. 2. Варианты новых единичных актов разрушения: а – между плоскими поверхностями; б – между плоской опорной поверхностью и одним рядом стержней; в – между двумя рядами стержней

Результаты разрушения приведены на рис. 3.

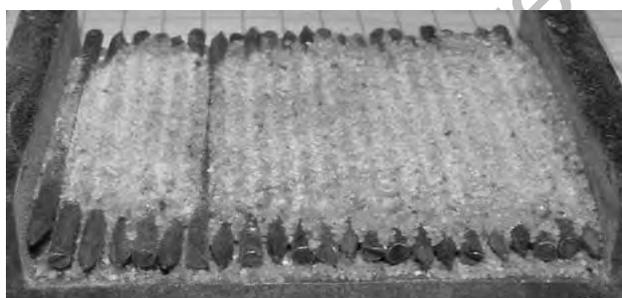
Наиболее эффективным оказалось разрушение между двумя рядами стержневых элементов, что отражено в

табл. 1 и объясняется наличием в механизме разрушения нескольких составляющих, создающих в материале сложное напряженное состояние.

а)



б)



в)

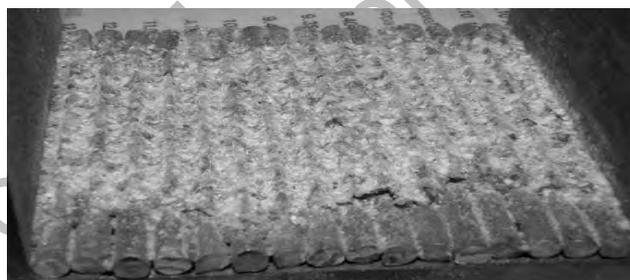


Рис. 3. Картина разрушения: а – разрушение между двумя плоскими поверхностями; б – разрушение между плоской поверхностью и стержневым элементом (один ряд стержней); в – разрушение между плоской поверхностью и стержневым элементом (два ряда стержней)

Табл. 1. Результаты измельчения песка при различных методах нагружения

Размер частиц, мм	Менее, 08	0,08...0,14	0,14...0,315	0,315...0,63	0,63...1,25
Исходный песок, %	–	–	–	–	< 100
Между пластинами, %	6,1	5,0	23,8	31,9	33,2
С одним рядом стержней, %	9,0	7,2	20,9	28,8	34,1
С двумя рядами стержней, %	16,1	8,0	18,8	36,1	21,0

Описанные выше подходы послужили основанием для создания на их основе целого ряда механизмов разрушения для технологических аппаратов многоцелевого назначения.

### **Новые механизмы измельчения твердых тел**

**Рессорно-стержневая мельница.**  
В общем случае механизм разрушения

производится концентрично расположенными между собой дугообразно изогнутыми элементами, периодически сближающимися между собой и производящими разрушение материала взаимнообращенными друг к другу поверхностями (рис. 4). При этом один из элементов может быть неподвижен.

Наиболее целесообразно кассетное выполнение рабочего оборудования таким образом, что нижние элементы установлены неподвижно с определенным зазором, параллельно друг другу, а верхние связаны с приводом возвратно-поступательного перемещения также с зазором, но в плане смещены относи-

тельно нижних и также имеют зазоры. Варианты рессорного и стержневого исполнения рабочего оборудования приведены на рис. 5...7.

Собственно рабочие элементы в зависимости от назначения можно изготавливать из стержней круглого сечения или рессор с отогнутыми для закрепления на подмоторной плите концами. Привод же представляет собой балансирную систему с противофазно установленными дебалансами вибраторов.

Такой способ измельчения эффективен для грубого помола на предварительных стадиях измельчения в крупнотоннажных производствах.

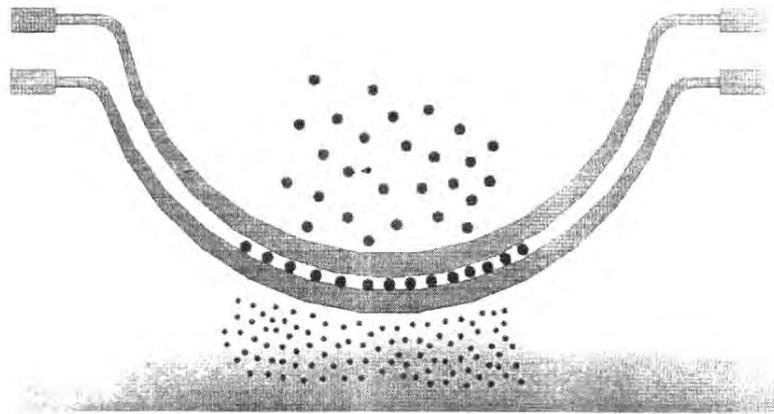
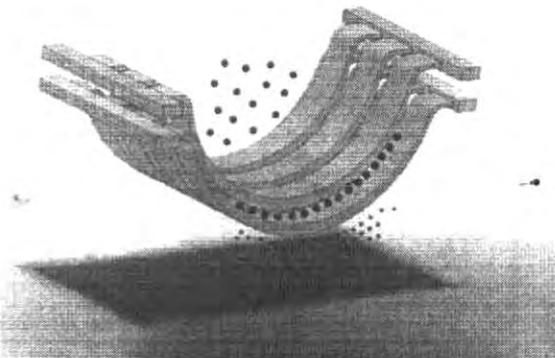


Рис. 4. Механизм разрушения в рессорно-стержневой мельнице

а)



б)

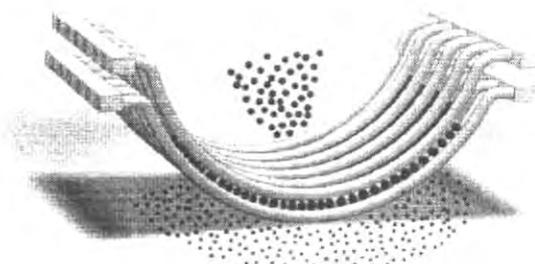


Рис. 5. Основные варианты выполнения рабочего оборудования рессорно-стержневой мельницы: а – рессорное исполнение; б – стержневое исполнение

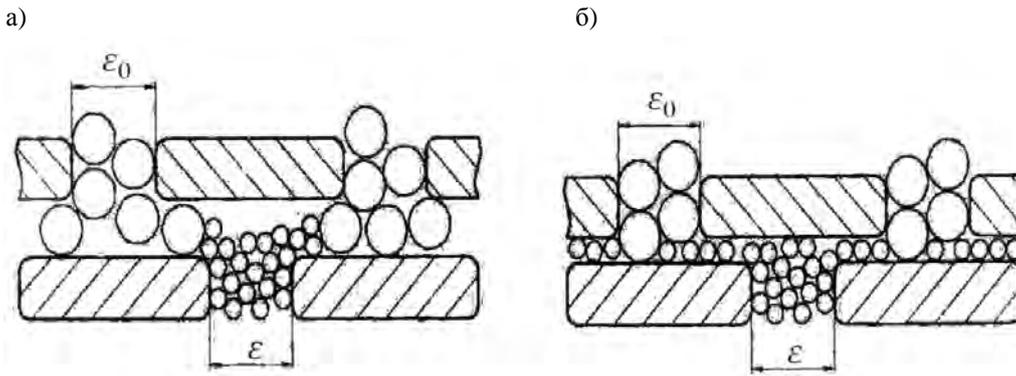


Рис. 6. Механизм разрушения рессорными элементами: а – захват частиц материала; б – сжатие и разрушение

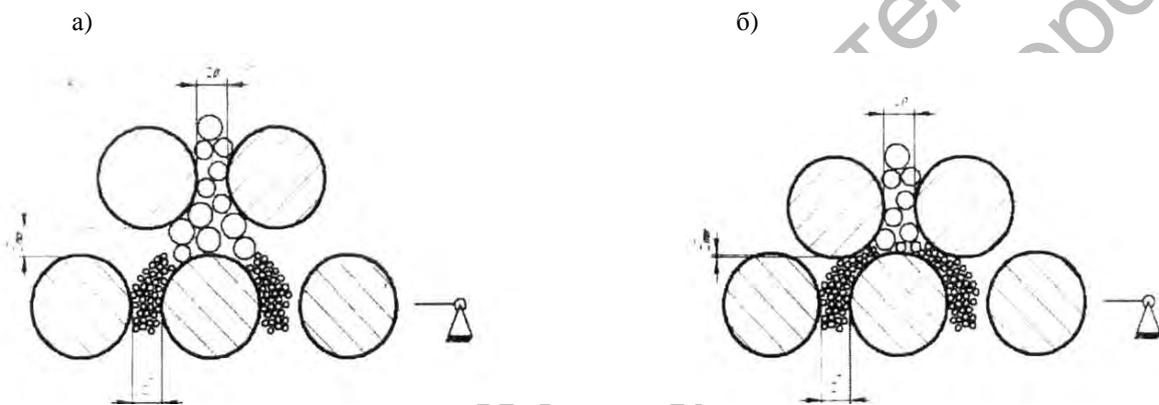


Рис. 7. Механизм разрушения стержневыми элементами: а – захват материала; б – сжатие и разрушение

**Штифтовый способ измельчения.** Принципиальная схема проведения штифтового измельчения приведена на

рис. 8, а один из вариантов исполнения штифтового рабочего органа – на рис. 9 [18].

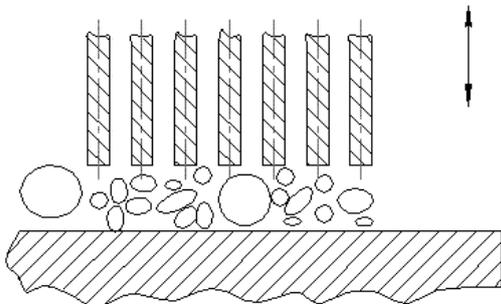


Рис. 8. Механизм штифтового измельчения



Рис. 9. Вариант выполнения рабочего органа

Набор штифтов (стержней) определяется исходя из характеристик перерабатываемого материала и может иметь множество конструктивных решений как по расположению стержней, так и по их закреплению их на планшайбе.

По сути, это торцевая щётка с металлическими элементами. В зависимости от условий эксплуатации форма щеток может быть круглой, прямоугольной, трапецидальной и др., а по расположению их рабочих поверхностей – плоской, клиновидной, конической, ступенчатой и т. д.

Стержни соединены в кассеты и одной своей стороной жестко закреплены в планшайбе, толкатель которой связан с приводом. Диаметры стержней (штифтов) могут составлять от 0,05 до 20...30 мм в зависимости от характеристик измельчаемого материала.

Наиболее просто штифтовый рабочий орган выполнять из стандартных элементов, например, кусков канатов, жгутов или набора отдельных проволок.

Штифтовый рабочий орган обеспечивает огромное количество циклических актов воздействия (ударов) на перерабатываемые материалы. Например, для прямоугольного исполнения рабочих органов размером 400×400 мм при диаметре штифтов 7,5 мм и зазоре между ними 2,5 мм, наличию зоны 100×100 мм, где

штифтов нет, при частоте колебаний 25 Гц количество единичных воздействий в час составит более 500 млн. Это соизмеримо с количеством соударений шаров в промышленной шаровой мельнице с размерами 3,2×14 м.

Штифтовая мельница, по нашему мнению, может найти применение для помола различных материалов при производстве цемента, ячеистого бетона, помола кварцевого песка, помола алюминиевой пудры, цемента и извести и механоактивации композиций смеси.

### Заключение

Причины чрезвычайно низкой энергетической эффективности дезинтеграции хорошо известны. Они заключаются в несовершенстве единичных актов разрушения твердых тел и огромной доле трения между частицами измельчаемого материала и элементами рабочих органов машин.

С целью повышения эффективности дезинтеграторных технологий предложены новые механизмы измельчения, основанные на принципах адаптивности и технологической вибротехники. Результаты выполненной работы, в том числе полученные экспериментально, можно рассматривать как концептуальную базу создания принципиально новых технологических аппаратов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сиваченко, Л. А. Современное технологическое машиностроение. Основные положения / Л. А. Сиваченко // Инженер-механик. – 2010. – № 4. – С. 10–20.
2. Сиваченко, Л. А. Современное технологическое машиностроение. Резервы развития / Л. А. Сиваченко // Инженер-механик. – 2011. – № 1. – С. 11–21.
3. Сиваченко, Л. А. Измельчение – основное звено энерготехнологической концепции национальной безопасности / Л. А. Сиваченко // Интерстроймех-2010 : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Белгород : БГТУ, 2010. – Т. 2. – С. 121–127.
4. Сиваченко, Л. А. Технологическое машиностроение – стратегический резерв развития промышленности Республики Беларусь / Л. А. Сиваченко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2011. – № 3. – С. 126–130.
5. Технологические аппараты адаптивного действия / Л. А. Сиваченко [и др.]. – Минск : БГУ, 2008. – 375 с.
6. Селективное разрушение минералов / В. И. Ревнивцев [и др.]. – М. : Недра, 1988. – 286 с.
7. Вибрационная дезинтеграция твердых материалов / В. И. Ревнивцев [и др.]. – М. : Недра, 1992. – 430 с.

8. **Денисов, Г. А.** Теоретические предпосылки и пути повышения эффективности технологических процессов дезинтеграции технологического сырья / Г. А. Денисов // Технологические процессы и оборудование для дезинтеграции различных материалов и производства порошков : междунар. сб. науч. тр. – Л., 1991 – С. 4–9.
9. **Ходаков, Г. С.** Физика измельчения / Г. С. Ходаков. – М. : Недра, 1972. – 360 с.
10. **Вайтехович, П. Г.** Интенсификация и моделирование процессов диспергирования в поле инерционных сил / П. Г. Вайтехович. – Минск : БГТУ, 2008. – 220 с.
11. **Витязь, П. А.** Высокие технологии и наноматериалы в строительной индустрии / П. А. Витязь, В. Г. Горобцев // Строительная наука. – 2009. – № 6. – С. 4–16.
12. **Авакумов, Е. Г.** Механические методы активации химических процессов / Е. Г. Авакумов. – Новосибирск : Наука, 1986. – 303 с.
13. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых / В. А. Перов [и др.]. – М. : Недра, 1990. – 301 с.
14. Установки, использующие электроимпульсную дезинтеграцию твердых тел. Перспективы развития / В. И. Курец [и др.] // Обогащение для дезинтеграции минерального сырья : межведомств. сб. науч. тр. – СПб., 1991 – С. 105–117.
15. Новые методы разрушения горных пород / М. А. Емелин [и др.]. – М. : Недра, 1990. – 240 с.
16. **Акунов, В. И.** Струйные мельницы / В. И. Акунов. – Л. : Машиностроение, 1967. – 260 с.
17. **Колосов, А. С.** Некоторые вопросы моделирования и оценки энергетической эффективности процессов измельчения твердых тел / А. С. Колосов // Изв. СО АН СССР. – 1985. – Вып. 2. – С. 26–39.
18. **Сиваченко, Л. А.** Пути развития конструкций рессорно-стержневых мельниц / Л. А. Сиваченко, Е. А. Шаройкина, А. Н. Хустенко // Интерстроймех-2011 : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 5–7 окт. 2011 г. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2011. – С. 22–226.

#### LIST OF LITERATURE

1. **Sivachenko, L. A.** Modern technological machine-building. Basic principles / L. A. Sivachenko // Mechanical engineer. – 2010. – № 4. – P. 10–20.
2. **Sivachenko, L. A.** Modern technological machine-building. Reserves of development / L. A. Sivachenko // Mechanical engineer. – 2011. – № 1. – P. 11–21.
3. **Sivachenko, L. A.** Disintegration is the essential part of energy-technological concept of national safety / L. A. Sivachenko // Interstroimekh-2010 : mater. of intern. scien. techn. conf. – Belgorod : BGTU, 2010. – Vol. 2. – P. 121–127.
4. **Sivachenko, L. A.** Technological machine building – a strategic reserve of the development of Belarusian industry // Her. of Belarus.-Rus. Un-ty. – 2011. – № 3. – P. 126–130.
5. Technological apparatuses of adaptive action / L. A. Sivachenko [et al.] – Minsk : BGU, 2008. – 375 p.
6. Selective disintegration of minerals / V. I. Revnitvsev [et al.]. – M. : Nedra, 1988. – 286 p.
7. Vibration disintegration of hard materials / V. I. Revnitvsev [et al.]. – M. : Nedra, 1992. – 430 p.
8. **Denisov, G. A.** Theoretical background and ways of increasing the efficiency of technological processes of disintegration of technological raw materials / G. A. Denisov // Technological processes and equipment for disintegration of different materials and production of powders : Intern. col. of scien. papers. – L., 1991. – P. 4–9.
9. **Khodakov, G. S.** Disintegration physics / G. S. Khodakov. – M. : Nedra. 1972. – 360 p.
10. **Vaitekhovich, P. G.** Intensification and modeling of dispersion processes in the inertial forces field / P. G. Vaitekhovich. – Minsk : BGTU, 2008. – 220 p.
11. **Vityaz, P. A.** High technologies and nano-materials in construction industry / P. A. Vityaz, V. G. Gorobtsev // Construction science. – 2009. – № 6. – P. 4–16.
12. **Avakumov, E. G.** Mechanical methods of the activation of chemical processes / E. G. Avakumov. – Novosibirsk : Nauka, 1986. – 303 p.
13. Disintegration, grinding and sizing of minerals / V. A. Perov [et al.]. – M. : Nedra, 1990. – 301 p.
14. The installation using electro-pulse disintegration of solid bodies; prospects of development / V. I. Kurets [et al.] // Concentration for raw materials disintegration : Inter-departmental col. of scien. papers. – St.P., 1991. – P. 105–117.
15. New methods of rock disintegration / M. A. Yemelin [et al.] – M. : Nedra, 1990. – 240 p.
16. **Akumov, V. I.** Jet-type mills / V. I. Akumov. – L. : Mashinostroenie, 1967. – 260 p.
17. **Kolosov, A. S.** Some issues of modeling and estimating the energy efficiency of processes of solid bodies disintegration / A. S. Kolosov // Izv. AN SSSR. – 1985. – Issue. 2 – P. 26–39.

18. **Sivachenko, L. A.** Ways of development of spring-rod mills designs / L. A. Sivachenko, E.A. Sharoikina, A. N. Khustenko // Interstroimekh-2011 : materials of Intern. scient.-tech. conf., Mogilev, 5–7 Oct. 2011. – Mogilev : Belorus.-Ros. un-t, 2011. – P. 222–226.

LIST OF LITERATURE (TRANSLITERATION)

1. **Sivachenko, L. A.** Sovremennoe tekhnologicheskoe mashinostroenie. Osnovnye polozheniya / L. A. Sivachenko // Inzhener-mekhanik. – 2010. - № 4. – S. 10–20.
2. **Sivachenko, L. A.** Sovremennoe tekhnologicheskoe mashinostroenie. Rezervy razvitiya / L. A. Sivachenko // Inzhener-mekhanik. – 2011. – № 1. – S. 11–21.
3. **Sivachenko, L. A.** Izmel'chenie – osnovnoe zveno energotekhnologicheskoy kontseptsii natsionalnoj bezopasnosti / L. A. Sivachenko // Interstrojmekh-2010 : materialy Mezhdunar. nauch. tekhn. konf. – Belgorod : BGTU, 2010. – T. 2. – S. 121–127.
4. **Sivachenko, L. A.** Tekhnologicheskoe mashinostroenie – strategicheskij rezerv razvitiya promyshlennosti Respubliki Belarus / L. A. Sivachenko // Vestn. Belorus.-Ros. un-ta. – 2011. – № 3. – S. 126–130.
5. Tekhnologicheskie apparaty adaptivnogo dejstviya / L. A. Sivachenko [i dr.]. – Minsk : BGU, 2008. – 375 s.
6. Selektivnoe razrushenie mineralov / V. I. Revnivitsev [i dr.]. – M. : Nedra, 1988. – 286 s.
7. Vibratsionnaya dezintegratsiya tverdykh materialov / V. I. Revnivitsev [i dr.]. – M. : Nedra, 1992. – 430 s.
8. **Denisov, G. A.** Teoreticheskie predposylki i puti povysheniya effektivnosti tekhnologicheskikh protsessov dezintegratsii tekhnologicheskogo syr'ya / G. A. Denisov // Tekhnologicheskie protsessy i oborudovanie dlya dezintegratsii razlichnykh materialov i proizvodstva poroshkov : Mezhdunar. sb. nauch. tr. – L., 1991. – S. 4–9.
9. **Khodakov, G. S.** Fizika izmel'cheniya / G. S. Khodakov. – M. : Nedra, 1972. – 360 s.
10. **Vaitekhovich, P. G.** Intensifikatsiya i modelirovanie protsesov dispergirvaniya v pole inertsionnykh sil / P. G. Vaitekhovich. – Minsk : BGTU, 2008. – 220 s.
11. **Vityaz, P. A.** Vysokie tekhnologii i nanomaterialy v stroitel'noi industrii / P. A. Vityaz, V. G. Gorobtsev // Stroitel'naya nauka. – 2009. – № 6. – S. 4–16.
12. **Avakumov, E. G.** Mekhanicheskie metody aktivatsii khimicheskikh protsessov / E. G. Avakumov. – Novosibirsk : Nauka, 1986. – 303 s.
13. Droblenie, izmel'chenie i grokhochenie poleznykh iskopayemykh / V. A. Perov [i dr.]. – M. : Nedra, 1990. – 301 s.
14. Ustanovki, ispol'zuyushchie elektroimpulsnyuyu dezintegratsiyu tverdykh tel; perspektivy razvitiya / V. I. Kurets [i dr.] // Obogashchenie dlya dezintegratsii mineral'nogo syr'ya : mezhved. sb. nauch. tr. – SPb. – 1991. – S. 105–117.
15. Novye metody razrusheniya gornykh porod / M. A. Yemelin [i dr.]. – M. : Nedra, 1990. – 240 s.
16. **Akumov, V. I.** Strujnye mel'nitsy / V. I. Akumov. – L. : Mashinostroenie, 1967. – 260 s.
17. **Kolosov, A. S.** Nekotorye voprosy modelirovaniya i otsenki energeticheskoy effektivnosti protsessov izmel'cheniya tverdykh tel / A. S. Kolosov // Izv. AN SSSR. – 1985. – Vyp. 2. – S. 26–39.
18. **Sivachenko, L. A.** Puti razvitiya konstruksij ressonno-sterzhnevyykh mel'nits / L. A. Sivachenko, E. A. Sharoikina, A. N. Khustenko // Interstrojmekh-2011 : materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., Mogilev, 5–7 Okt. 2011. – Mogilev : Belorus.-Ros. un-t, 2011. – S. 222–226.

Статья сдана в редакцию 30 сентября 2011 года

Леонид Александрович Сиваченко, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. E-mail: 228011@mail.ru.

Leonid Alexandrovich Sivachenko, DSc, Professor, Belarusian-Russian University. E-mail: 228011@mail.ru.