

×ÀCÒÛ Ì ÅÕÀÍ È×ÅCÊÈÅ ÒÐÅÒÛВ Ì ÐÎ ÆÅCÑÛ

ÃËÀÂÀ XIX ÈÇÌ ÅËÛ×ÅÍ ÈÅ ÒÅÐÄÛÕ Ì ÀÒÐÈÀËË Å

Измельчение — процесс механического разрушения твердого материала с целью получения фракций с меньшим размером частиц (кусков). Измельчение в нефтегазоперерабатывающей промышленности применяют при дроблении кокса, производстве молотой серы, катализаторов и отбеливающих глин для адсорбционной очистки масел и др.

ÔÈÇÈ×ÅÑÈÈÅ Î ÑÎ Î ÅÛ ÈÇÌ ÅËÛ×ÅÍ ÈВ ÒÅÐÄÛÕ Ì ÀÒÐÈÀËË Å

Основной характеристикой процесса измельчения является *степень измельчения*, под которой понимают отношение диаметров кусков исходного материала D и образовавшихся после его измельчения d :

$$i = \frac{D}{d}.$$

Степень измельчения материала i за одну обработку обычно составляет для крупных и средних частиц $2 \div 10$, для мелких $10 \div 50$ и более.

На практике для характеристики процесса измельчения используют также объемную степень измельчения i_0 :

$$i_0 = D^3 / d^3.$$

Более полной характеристикой материала является его удельная поверхность, т.е. поверхность кусков, приходящаяся на единицу их массы или объема.

Часто для характеристики материала используют его фракционный состав, выраженный в долях или процентах частиц близких размеров (узких фракций).

Измельчение твердого материала может производиться в открытом или закрытом (замкнутом) цикле, а также в один или несколько приемов (ступеней).

При измельчении в открытом цикле обрабатываемый материал проходит через дробилку один раз. Обычно мелочь, содержащуюся в исходном материале, предварительно отделяют и добавляют в конечный продукт (рис. XIX-1, а). Высокая степень измельчения материала в один прием часто нежелательна, так как наряду с крупными кусками материала одновременно

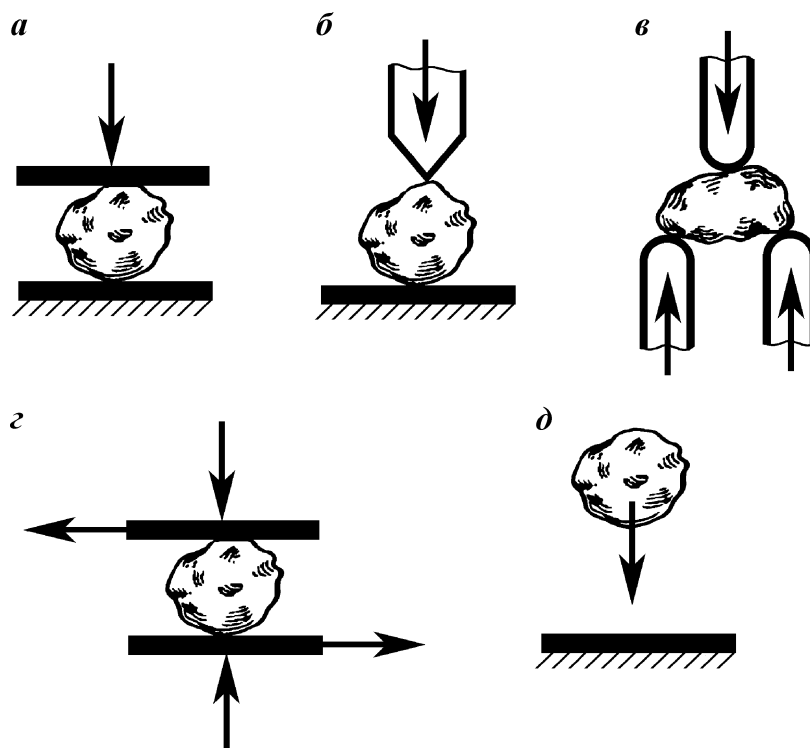


Рис. XIX-2. Способы разрушения материала при измельчении:

a — раздавливание; *б* — раскалывание; *в* — разламывание; *г* — истирание; *д* — удар

транспортирование измельченного материала. Размеры кусков, соответствующие этим видам измельчения, приведены в табл. XIX.1.

При измельчении материалов расходуется значительное количество энергии, поэтому одной из важнейших характеристик машины является количество энергии, затрачиваемой для обеспечения заданной степени измельчения. Наибольшее распространение по оценке расхода энергии на измельчение материала имеют две теории процесса измельчения: *поверхностная* и *объемная*.

Таблица XIX.1

Вид измельчения	Размер кусков, мм	
	до измельчения	после измельчения
Дробление:		
крупное	1000	250
среднее	250	20
мелкое	20	1÷5
Помол:		
грубый	1÷5	0,04÷0,1
средний	0,04÷0,1	0,005÷0,015
тонкий	0,005÷0,015	0,001÷0,005
коллоидный	< 0,1	< 0,001

Поверхностная теория исходит из предположения, что работа, затрачиваемая на измельчение, пропорциональна поверхности образующихся при измельчении частиц.

Для упрощения ее понимания примем, что материал, как подлежащий измельчению, так и образующийся в результате этого процесса, состоит из кубиков. Тогда кубик с начальной стороной D при степени измельчения $i = 2$ и поверхностью $6D^2$ должен быть расчленен тремя плоскостями, в результате чего образуется 8 новых кубиков со стороной $d = D/2$ и поверхностью $12D^2$. Вновь образовавшаяся поверхность при этом будет равна $6D^2$. При степени измельчения $i = 3$ исходный кубик должен быть расчленен шестью плоскостями до получения 27 новых кубиков со стороной $d = D/3$ и поверхностью $18D^2$, а вновь образовавшаяся поверхность будет равна $12D^2$. Аналогичными рассуждениями можно показать, что при степени измельчения i число плоскостей расчленения составит $3(i - 1)$, число вновь образовавшихся кубиков равно i^3 , а суммарная вновь образовавшаяся поверхность кубиков составит $6(i - 1)D^2$.

Если на образование единицы новой поверхности при измельчении данного материала затрачивается работа A_{ya} , то работа, затрачиваемая на измельчение, будет равна

$$A = A_{ya} \cdot 6(i - 1)D^2.$$

В действительности как исходный, так и дробленый материал представляют куски (частицы) неправильной формы, поэтому работа на измельчение будет больше теоретической:

$$A = KA_{ya} \cdot 6(i - 1)D^2, \quad (\text{XIX.1})$$

где $K = 1,2 \div 1,7$ — коэффициент, зависящий от свойств материала и способа измельчения.

Величину KA_{ya} находят из опыта; для этого проводят измельчение образца исходного материала с замером затраченной энергии и степени измельчения.

При сравнительно большой степени измельчения можно принять, что $i - 1 \approx i$ и, следовательно, в соответствии с уравнением (XIX.1) работа, затрачиваемая на измельчение, пропорциональна степени измельчения.

Объемная теория предполагает, что расход энергии на измельчение пропорционален объему (или массе) куска материала, так как при измельчении материала работа тратится на его деформации, предшествующие разрушению.

В соответствии с законом Гука работа измельчения определяется из выражения

$$A = \frac{\sigma^2 \Delta V}{2E},$$

где σ — разрушающее напряжение материала при деформации (раздавливании); E — модуль упругости материала; ΔV — разность объемов кусков материала до и после измельчения.

Обе рассмотренные теории не согласуются полностью с практикой.

Первая теория в большей степени подтверждается при мелком дроблении, вторая — при среднем и крупном дроблении.

По ожидаемой степени измельчения материала размольные машины подразделяются на три основные группы:

- для крупного дробления (предварительное измельчение);
- для среднего и мелкого дробления;
- для тонкого измельчения.

МАШИНЫ КРУПНОГО ДРОБЛЕНИЯ

Щековая дробилка. Наиболее распространенной машиной этого типа является щековая дробилка. Основные ее части — две щеки (неподвижная и подвижная), между которыми происходит раздавливание твердого материала. Перемещение подвижной щеки осуществляется периодически, причем имеются различные варианты (рис. XIX-3).

При сближении щек происходит раздавливание материала, при обратном ходе подвижной щеки раздавленный материал через шпальт падает вниз, а на его место сверху через зев поступает новая порция.

При варианте с наибольшим размахом зева (рис. XIX-3, б) обеспечивается более равномерное дробление.

Щековая дробилка с равномерно перемещающейся щекой (рис. XIX-3, в) конструктивно более сложна, но в меньшей степени подвержена забиванию. Щеки могут быть гладкими (для мелкого дробления) или ребристыми (для крупного дробления).

Щековую дробилку характеризуют две величины: размер зева (верхнее широкое расстояние между щеками) и размер шпальта (нижнее минимальное расстояние между щеками). Этими размерами в известной степени определяется и угол захвата φ , образованный двумя щеками. Этот угол обычно составляет $15 \div 25^\circ$. При большем значении угла φ куски материала могут выскакивать из зева, так как силы трения материала о поверхность щек оказываются недостаточными; при малом значении угла φ степень измельчения будет незначительной. Число перемещений щеки выбирается с таким расчетом, чтобы за время, в течение которого щека отходит вправо, раздавленный материал успел высыпаться.

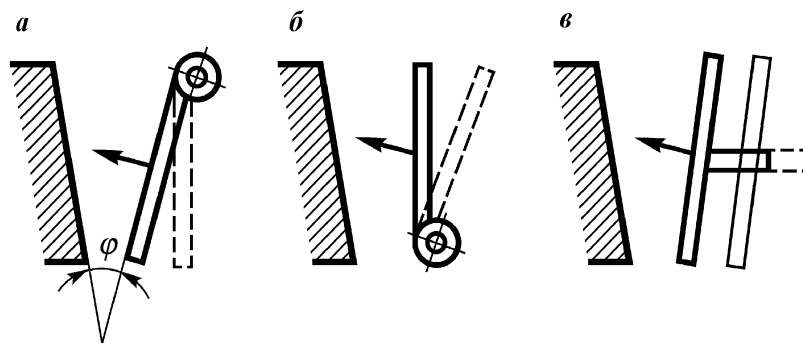


Рис. XIX-3. Схема движения щек в дробилках:

а — с наибольшим размахом в шпальте; б — с наибольшим размахом в зеве; в — с равномерным перемещением щеки

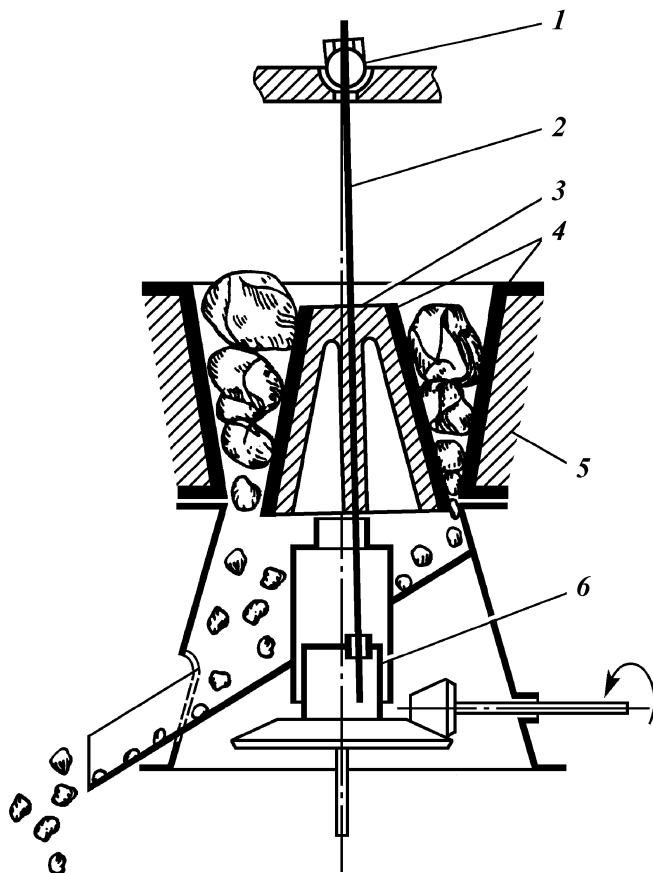


Рис. XIX-4. Конусная дробилка:

1 — опора; 2 — главный вал; 3 — дробящая головка; 4 — защитные плиты; 5 — корпус; 6 — стакан-эксцентрик

Конусные дробилки. Для крупного дробления применяются также конусные дробилки, в которых измельчение (раздавливание) осуществляется за счет сжатия материала, помещенного между двумя усеченными конусами (рис. XIX-4). Внутренний конус, вращаясь эксцентрично, приближается к стенке наружного конуса, зажимает материал и измельчает его. Раздробленный материал выталкивается в расширяющуюся часть конической кольцевой щели и сыпается вниз.

Достоинство дробилок этого типа — меньший расход энергии и меньшее пылеобразование. Конусные дробилки выпускаются с верхней или нижней опорой вертикального вала.

МАШИНЫ СРЕДНЕГО И МЕЛКОГО ДРОБЛЕНИЯ

К наиболее распространенным машинам этого типа относятся валковые дробилки, молотковые мельницы и дезинтеграторы.

Валковые дробилки. Схема валковой дробилки показана на рис. XIX-5. На массивной раме укреплены в подшипниках пара валков, вращаю-

щихся в разные стороны. Между валками образуется зазор $2e$ (рис. XIX-6), которым и определяется размер измельченного материала. Исходный материал поступает на валки сверху и под действием сил трения затягивается ими и раздавливается. Благодаря вращению валков раздавливание в известной степени сопровождается истиранием материала. Для предотвращения поломки валков при измельчении особо прочных материалов предусматривается возможность перемещения одного из валков в сторону. Подвижной валок крепится к станине при помощи пружины, которая выбирается с таким расчетом, чтобы при нормальной работе расстояние между валками было равно $2e$, так что при сжатии пружины валок перемещается в сторону только в аварийном случае. В ряде случаев наружная поверхность валков делается рифленой или зубчатой.

Валки затягивают не всякий материал, а только куски определенных размеров. Вертикальная составляющая выталкивает материал вверх, а сила трения тянет его вниз. Угол захвата в этих машинах должен быть меньше двойного угла трения, т.е. $\varphi < 34^\circ$.

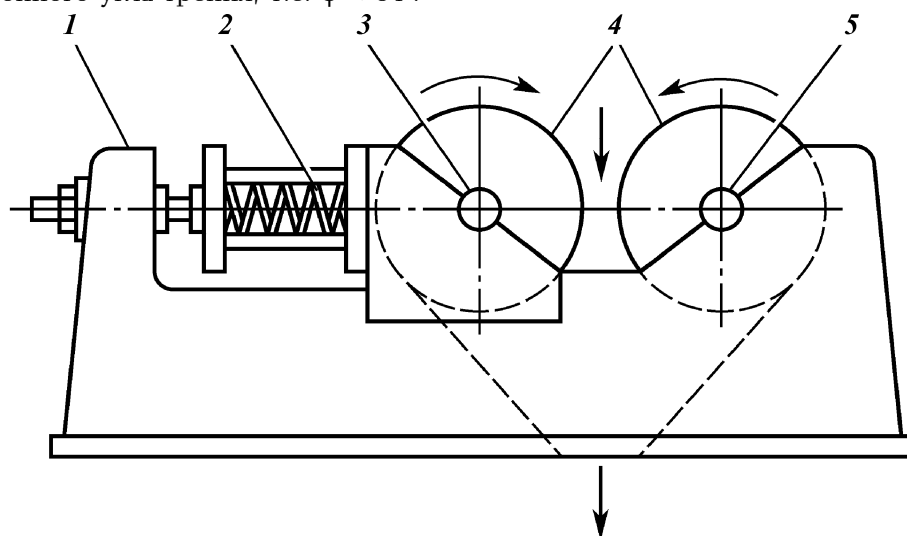


Рис. XIX-5. Схема валковой дробилки:

1 — рама; 2 — пружина; 3 — подвижная ось; 4 — валки; 5 — неподвижная ось

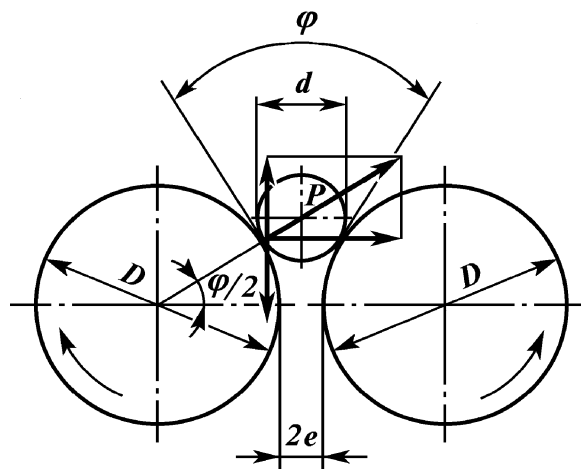


Рис. XIX-6. Схема к расчету валковой дробилки

Угол захвата валков образуется касательными, проведенными в точках касания куска материала и поверхности валков, поэтому угол захвата уменьшается с увеличением диаметра валков и расстояния между валками, а также с уменьшением кусков измельченного материала.

Наибольший диаметр кусков измельчаемого материала d определяется из следующих положений. Согласно схеме, приведенной на рис. XIX-6,

$$\frac{D + 2e}{2} = \left(\frac{D + d}{2} \right) \cos \varphi / 2.$$

После преобразований

$$d = \frac{D \left(1 - \cos \varphi / 2 \right) + 2e}{\cos \varphi / 2},$$

где φ — угол захвата.

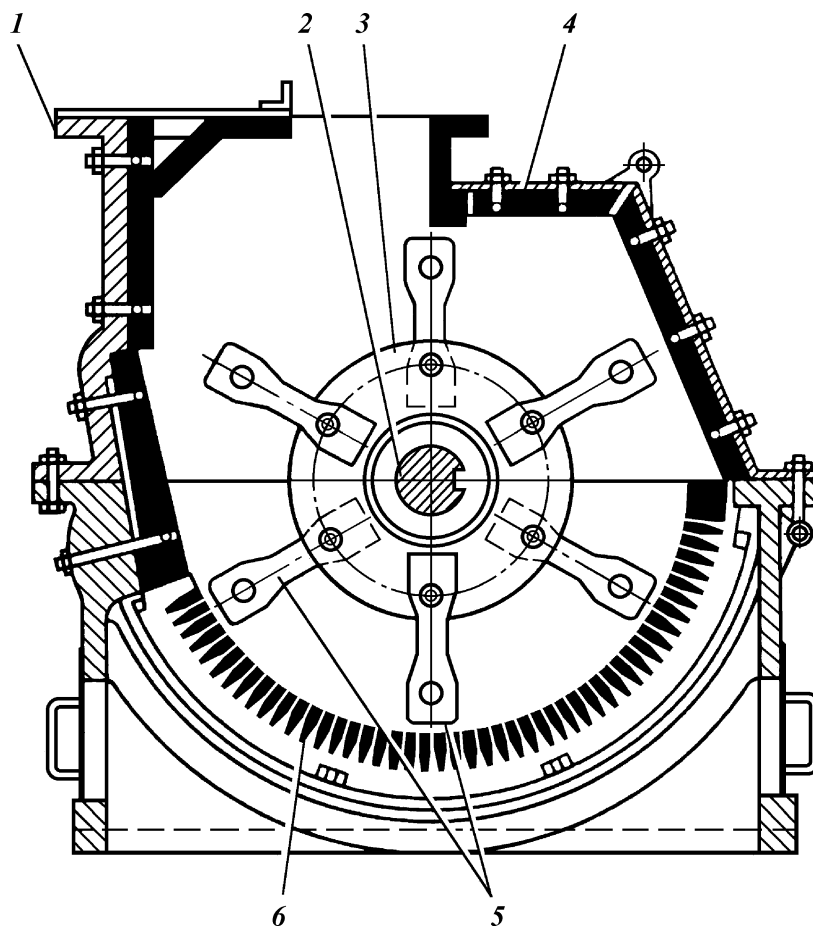


Рис. XIX-7. Конструкция молотковой дробилки:

1 — корпус; 2 — вал; 3 — диск; 4 — защитные плиты; 5 — молоток; 6 — колосниковая решетка

Молотковые мельницы (рис. XIX-7) представляют собой диск, вращающийся на горизонтальной оси внутри корпуса, выложенного износостойкими плитами.

На вращающемся диске по всей его окружности шарнирно укреплены молотки. При вращении диска (окружная скорость до 55 м/с) молотки получают радиальное направление и ударяют по поступающему в мельницу материалу, измельчая его.

Измельченный материал проталкивается через колосниковую решетку, расположенную в нижней части корпуса; степень измельчения регулируется изменением ширины щели этой решетки. В молотковых мельницах некоторых конструкций применяется пневматическое удаление измельченного материала потоком воздуха, проходящего через аппарат. Диаметр диска молотковых мельниц достигает 1,5 м, а скорость вращения составляет 500–800 об/мин для крупных мельниц и 1000÷2500 об/мин для малых. Степень измельчения изменяется от 10 до 15 в однодисковых мельницах и от 30 до 40 в двухдисковых.

Дезинтеграторы и дисмембраторы (ударно-дисковые мельницы) относятся к классу машин свободного ударного действия и применяются для измельчения хрупких и мягких материалов с малой абразивностью (сера, соли, мел, красители, каолин и т.п.).

Дезинтеграторы состоят из двух дисков, закрепленных на валах (рис. XIX-8), вращающихся в разные стороны.

На дисках по окружности размещены ударные пальцы, расположенные таким образом, что каждый ряд пальцев одного диска входит между двумя рядами пальцев другого. Под действием центробежной силы поступающий в дезинтегратор материал отбрасывается дисками к периферии и попадает в область перемещающихся пальцев. При этом материал измель-

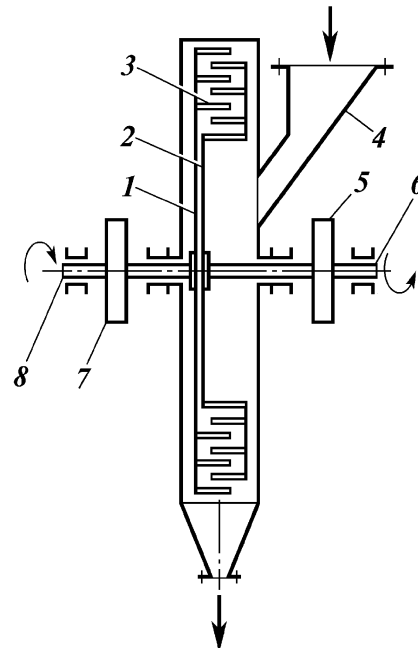


Рис. XIX-8. Схема устройства дезинтегратора (ударно-дисковой мельницы):
1, 2 — диски; 3 — ударные пальцы; 4 — загрузочная воронка; 5, 7 — шкивы; 6, 8 — валы

чается и выбрасывается через зазоры между пальцами в корпус мельницы, откуда и удаляется.

В отдельных конструкциях дезинтеграторов один из дисков может перемещаться, что позволяет очищать внутреннюю полость мельницы.

Материал, подлежащий измельчению, предварительно проходит через сита и электромагнитные сепараторы, извлекающие куски металла, что предотвращает повреждения ударных пальцев и дисков. Частота вращения дисков лежит в пределах от 1200 до 2200 об/мин.

В отличие от дезинтегратора у *дисмембратора* вращается лишь один диск с пальцами, а второй диск, также снабженный пальцами, неподвижен и образует откидную крышку. Благодаря этому, сохраняя принцип действия дезинтегратора, дисмембратор является более компактной машиной.

Барабан дисмембратора вращается внутри кольцевой решетки с круглыми или щелевыми отверстиями. Решетки служат для отсева мелких частиц требуемого размера и способствуют измельчению частиц при их ударе о решетку.

МАШИНЫ ТОНКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Тонкое измельчение осуществляется в машинах, использующих ударные и истирающие усилия. К машинам этого типа относятся барабанные мельницы, заполненные шарами или стержнями, кольцевые мельницы и бегуны.

Барабанные (шаровые) мельницы. В таких машинах измельчение материала происходит под действием ударов падающих шаров, а также за счет истирания его между шарами и внутренней поверхностью барабана. При вращении барабана шары за счет сил трения с внутренней стенкой поднимаются в направлении вращения барабана на некоторую высоту, а затем падают. Схема движения шаров в барабане мельницы под воздействием сил тяжести представлена на рис. XIX-9. Подобная работа шаров достигается при определенном числе оборотов барабана. При большом числе оборотов шары под действием центробежной силы прижимаются к корпусу барабана, не падают и тем самым не совершают полезной работы. При небольшом числе оборотов барабана шары поднимаются на недостаточную высоту, поэтому при их падении на материал не происходит эффективного измельчения. Для выбора необходимого числа оборотов барабана рассмотрим силы, действующие на шар (рис. XIX-10).

На шар, поднятый в барабане под действием силы трения, вдоль его стенки действуют центробежная сила P и сила тяжести G . Если размеры шара пренебрежимо малы по сравнению с размерами барабана, то величину центробежной силы можно определить из выражения

$$P = \frac{G}{g} \left(\frac{\pi n}{30} \right)^2 \frac{D}{2},$$

где n — число оборотов барабана в минуту.

Для отделения шара от стенки барабана при угле поворота α необходимо, чтобы центробежная сила была меньше силы, которая является составляющей силы тяжести G .

Из схемы, приведенной на рис. XIX-10, следует, что эта составляющая равна $G \sin \alpha$. Приравнявая эти силы и преобразуя, получаем

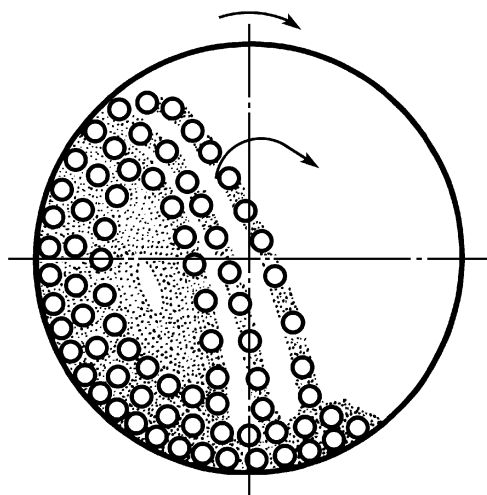


Рис. XIX-9. Схема перемещения шаров в мельнице

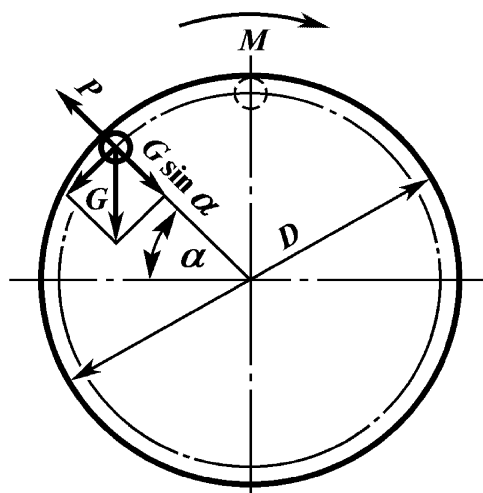


Рис. XIX-10. Схема сил, действующих на шар (к расчету барабанной шаровой мельницы)

$$n = 42,3 \sqrt{\frac{\sin \alpha}{D}}. \quad (\text{XIX.2})$$

Максимальное число оборотов барабана $n_{\text{кр}}$, при котором отделение шара будет наблюдаться из точки M , соответствует углу подъема 90° . При числе оборотов больше $n_{\text{кр}}$ центробежная сила будет превышать силу тяжести и шар не будет отрываться от внутренней поверхности барабана, т.е. нарушится нормальная работа мельницы. Предельное число оборотов барабана определится из уравнения (XIX.2) при $\alpha = 90^\circ$.

$$n_{\text{кр}} = \frac{42,3}{\sqrt{D}}. \quad (\text{XIX.3})$$

На практике число оборотов барабана обычно принимают равным 75 % от $n_{\text{кр}}$, что соответствует углу подъема $\alpha \approx 34^\circ$. Число оборотов барабана, определяемое уравнением (XIX.3), является приближенным, так как при этом не учитывается, что шары в барабане перемещаются в два-три слоя.

Диаметр шаров, загружаемых в барабан мельницы, зависит от начальных размеров измельчаемого материала, диаметра барабана и конечных размеров частиц измельченного продукта.

Энергия в шаровых мельницах расходуется главным образом на подъем шаров. Непосредственно на измельчение затрачивается сравнительно небольшая часть потребляемой мощности. По этой причине расход энергии в шаровых мельницах значительно превосходит расход энергии в машинах других конструкций.

Достоинством шаровых мельниц является их высокая производительность, возможность измельчения материалов различной твердости, постоянство качества помола, простота обслуживания и безопасность работы.

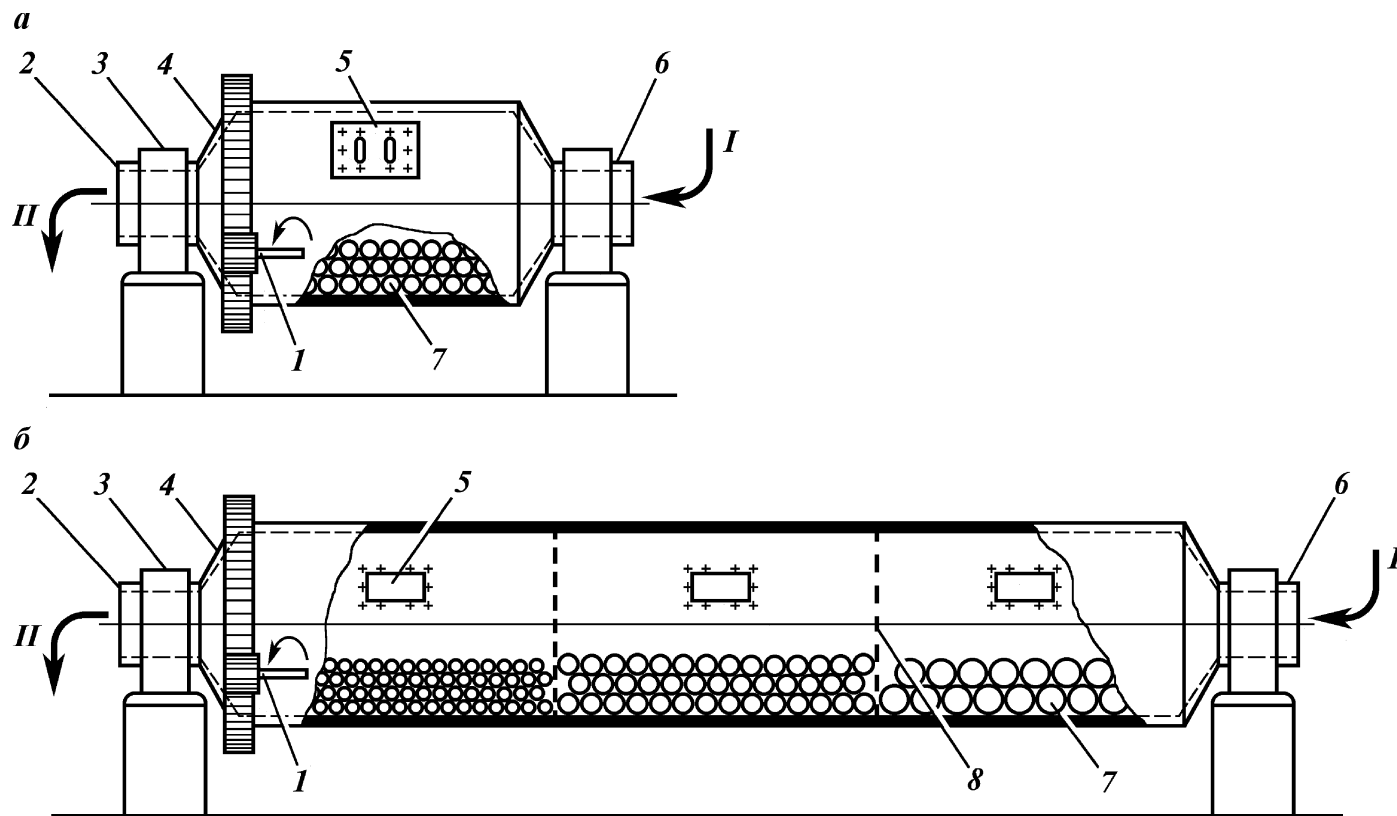


Рис. XIX-11. Барабанные мельницы:

а — однокамерная; б — многокамерная (трубчатая); 1 — зубчатый привод; 2 — разгрузочная полая цапфа; 3 — подшипник; 4 — барабан; 5 — люк; 6 — загрузочная полая цапфа; 7 — дробящие тела; 8 — диафрагма. Поток: I — исходный материал; II — измельченный материал

К недостаткам машин этого типа, наряду с отмеченным выше повышенным расходом энергии, относятся громоздкость, большая масса оборудования и значительный шум. Аналогичная работа протекает в барабанных мельницах, заполненных не шарами, а стержнями.

В конструктивном отношении шаровые мельницы подразделяются на следующие основные типы (рис. XIX-11):

однокамерные с диаметром барабана $1\div 4$ м и длиной $(1,5\div 2,0)D$ при диаметре шаров $30\div 175$ мм;

многокамерные (трубчатые), барабан которых длиной $(3\div 6)D$ разделен кольцевыми диафрагмами на ряд камер $(3\div 5)$, заполненных дробящими телами различных размеров. Такие мельницы обеспечивают измельчение материала до заданных размеров частиц без помощи классифицирующих устройств.

Загрузка и выгрузка дробящих тел производится через люки, а исходного и измельченного материала — через полые цапфы. Непрерывная выгрузка измельченного материала осуществляется потоком воздуха (сухое измельчение) или потоком воды (мокрое измельчение), которые подаются через загрузочную цапфу. Для отделения измельченного материала от несущих потоков воздуха или воды используют циклоны, отстойники, фильтры, гидроциклоны. Материал, выносимый потоком воздуха или воды, обычно содержит некоторое количество частиц крупнее требуемого размера. По этой причине барабанные мельницы работают часто в замкнутом цикле с сепаратором-классификатором, из которого целевая фракция частиц уходит по назначению, а более крупные возвращаются в мельницу на доизмельчение.

В мелкомасштабных производствах и на небольших опытных установках используют барабанные мельницы периодического действия. В таких аппаратах загрузка исходного и выгрузка измельченного материала производится через люк в цилиндрической стенке барабана. В этих мельницах часто совмещают измельчение материала с другими физическими или химическими процессами.

Кольцевые мельницы. В машинах этого типа материал измельчается раздавливанием и истиранием роликами или шарами, перемещающимися по поверхности вкладыша, выполненного в виде кольца. В зависимости от характера усилия, при помощи которого ролики или шары прижимаются к вкладышу, кольцевые мельницы подразделяются на *центробежные* и *пружинные*. В первых шары (валики) прижимаются под действием центробежной силы, во вторых — пружинами. Схемы кольцевых мельниц представлены на рис. XIX-12.

Кольцевая центробежно-маятниковая мельница (рис. XIX-12, а), оснащена роликами 2, которые насажены на маятники 3. При вращении маятников ролики под действием центробежной силы прижимаются к рабочей поверхности неподвижного кольца 1 и, вращаясь вокруг своей оси, измельчают материал, подаваемый в мельницу питателем 4. Измельченные частицы выносятся из корпуса мельницы воздухом (инертным газом) в классификатор, где крупные частицы отделяются и возвращаются на помол, а мелкие (целевая фракция) улавливаются в циклонах. Очищенный воздух из циклонов подается в мельницу вентилятором.

Кольцевые шаровые мельницы (рис. XIX-12, б) имеют два кольца — неподвижное 7 и подвижное 5, между которыми размещаются шары 6. Нажимным усилием пружины 8 кольца прижимаются к шарам. Вращение подвижного кольца приводит во вращение шары, за счет чего и происходит истирание материала. Исходный материал подается питателем во внутрен-

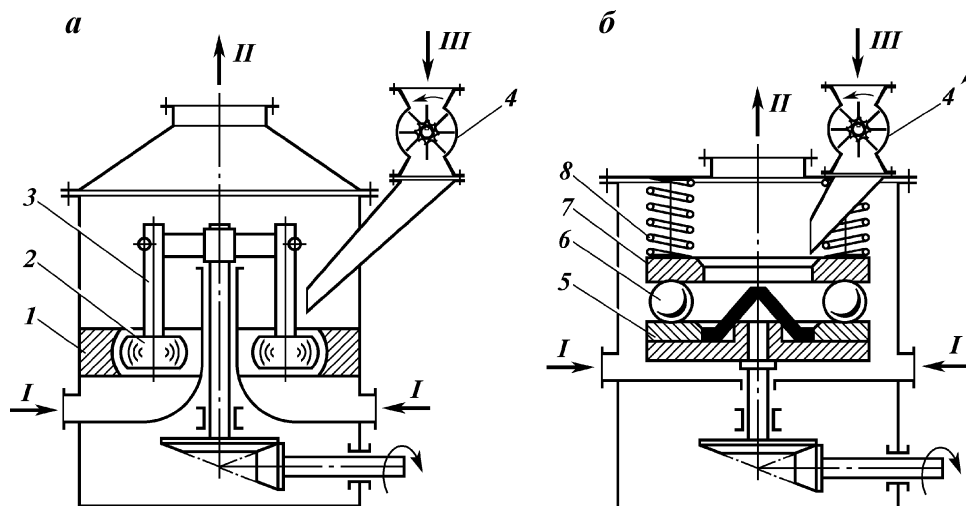


Рис. XIX-12. Схема кольцевых мельниц:

а — маятниковой; б — шаровой; 1 — кольцо; 2 — ролики; 3 — маятники; 4 — шлюзовой питатель; 5 — вращающееся кольцо; 6 — шары; 7 — неподвижное кольцо; 8 — пружины. Потoki: I — воздух (инертный газ); II — измельченный материал в смеси с воздухом (инертным газом); III — исходный материал

нюю полость подвижного кольца, пылеразделение и улавливание готового продукта осуществляются в замкнутом цикле, аналогичном описанному для маятниковых мельниц.

В кольцевых мельницах измельчается материал с начальными размерами частиц до $30 \div 35$ мм, степень измельчения составляет 60 и более. Такие мельницы обеспечивают измельчение материала до размера частиц $15 \div 18$ мкм.

Бегуны. Мельницы-бегуны состоят из катков, вращающихся на поверхности чаши (рис. XIX-13). Материал, попадающий в пространство между катками и чашей, истирается.

Применяются два типа мельниц-бегунов. К первому относятся машины, в которых чаша неподвижна, а катки вращаются под действием соответствующего привода. Бегуны второго типа имеют вращающуюся чашу с расположенным на ней материалом; катки же вращаются без специального привода под воздействием сил трения поверхности катков о материал.

Измельченный материал удаляют либо периодически при помощи скребков через борт чаши, либо непрерывно через щели или сетку у бортов чаши. Бегуны используются как для измельчения, так и для смешения материала. Частота вращения катков составляет $20 \div 50$ об/мин при вращающейся чаше и $10 \div 20$ при неподвижной. Бегуны обеспечивают степень измельчения, примерно равную 10 и более, начальный размер исходного измельчаемого материала до 20—50 мм.

Вибрационные мельницы (рис. XIX-14). Такие мельницы используются для особо тонкого измельчения. Они представляют собой барабан, на $70 \div 80$ % заполненный вибрирующими шарами. Барабан приводится в колебательное движение дебалансным валом.

Измельчение материала в вибрационных мельницах осуществляется благодаря интенсивному движению и частым соударениям вибрирующих

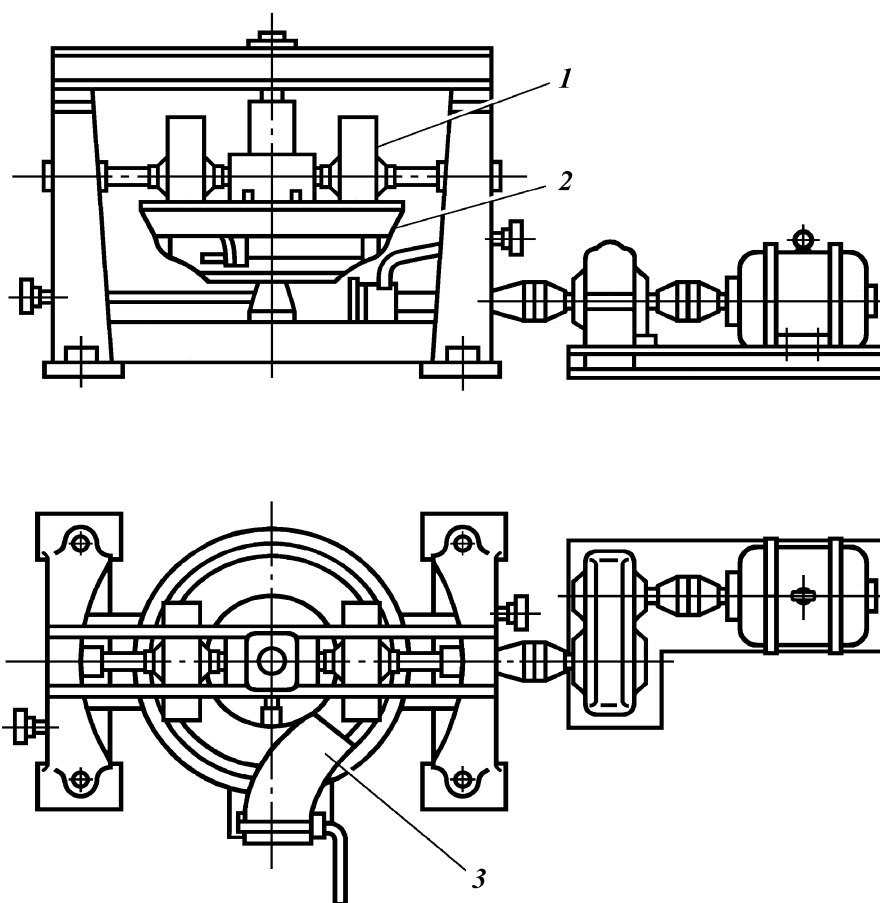


Рис. XIX-13. Конструкция мельниц-бегунов с вращающейся чашей:
1 — катки; 2 — чаша; 3 — скребок

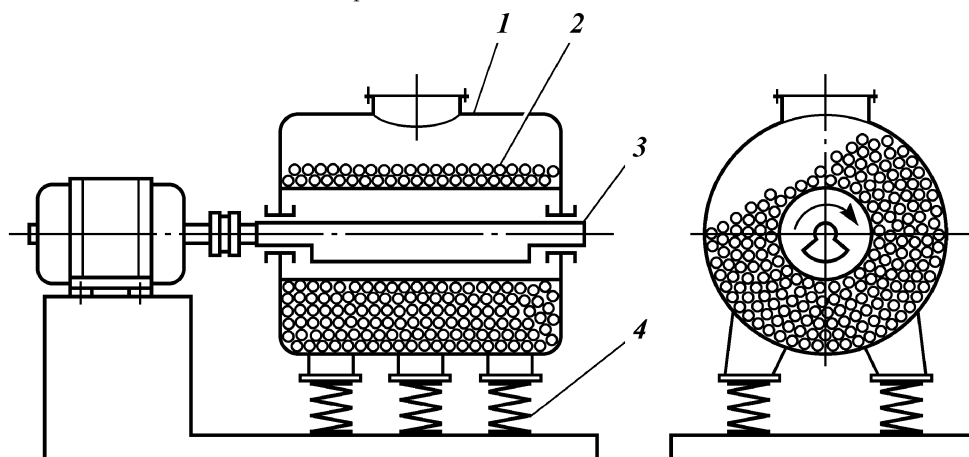


Рис. XIX-14. Схема вибрационной мельницы инерционного типа:
1 — корпус; 2 — дробящие тела; 3 — дебалансный вал; 4 — пружинящая опора

шаров. Корпус устанавливается на пружинящей опоре, предотвращающей передачу вибрации основанию мельницы.

Вибрационные мельницы используют как для сухого, так и для мокрого измельчения; они работают периодически или непрерывно. Такие мельницы эффективны для сверхтонкого измельчения материалов небольшой твердости, размеры зерен которого составляют от $1\div 2$ мм до 60 мкм и менее.