

## Лекция 4

### Процессы и установки переработки твердых отходов.

Наиболее рациональным способом защиты ОС от отходов производства и быта является освоение специальных технологий по сбору и переработке отходов.

Для переработки твердых отходов применяются такие процессы, как дробление и измельчение, классификация и сортировка, обогащение в тяжелых средах, отсадка, магнитная и электрическая сепарация, сушка и грануляция, термохимический обжиг, экстракция и др.

#### Механическая обработка твердых отходов

Для тех промышленных отходов, утилизация которых не связана с необходимостью проведения фазовых превращений или воздействия химических реагентов, но которые не могут быть использованы непосредственно, применяются два вида механической обработки: измельчение или компактирование (прессование). Это в равной степени относится к отходам как органического, так и неорганического происхождения.

После измельчения, за которым может следовать фракционирование, отходы превращаются в продукты, готовые для дальнейшего использования. Твердый материал можно разрушить и измельчить до частиц желаемого размера раздавливанием, раскалыванием, разламыванием, резанием, распиливанием, истиранием и различными комбинациями этих способов.

#### Дробление и измельчение

В зависимости от размера кусков исходного материала и конечного продукта измельчение условно делят на несколько классов. Под степенью  $i$  дробления и измельчения понимают отношение размеров наибольших кусков исходных твердых отходов и конечных продуктов дробления, измельчения.

Дробление и измельчение могут быть сухим и мокрым.

Для дробления и измельчения твердых отходов на минеральной основе применяют машины, в которых используются способы измельчения, основанные на раздавливании, раскалывании, разламывании, истирании и ударе.

Измельчение твердых отходов на органической основе осуществляют в машинах, принцип работы которых основан на распиливании, резании и ударе.

Дробление и измельчение осуществляют с помощью машин, называемых дробилками и мельницами. Классификация основного оборудования для измельчения твердых продуктов следующая:

- измельчители раскалывающего и разламывающего действия - щековые, конусные, зубовалковые и другие дробилки;
- измельчители раздавливающего действия - гладковалковые дробилки, ролико-кольцевые, вертикальные, горизонтальные и другие мельницы;
- измельчители истирающе-раздавливающего действия - гнерковые измельчители, бегуны, катково-тарельчатые, шаро-кольцевые, бисерные и другие мельницы;

- измельчители ударного действия - молотковые измельчители, бильные, шахтные мельницы, дезинтеграторы и дисмембраторы, центробежные, барабанные, газоструйные мельницы;
- ударно-истирающие и коллоидные измельчители — вибрационные, планетарные, виброкавитационные и прочие мельницы; реактроны;
- прочие измельчители (пуансоны, пилы и т.д.).

Для дробления применяют щековые, конусные, валковые дробилки, работающие по принципу раздавливания, и ударные дробилки (молотковые, роторные, дезинтеграторы) (рис. 36).

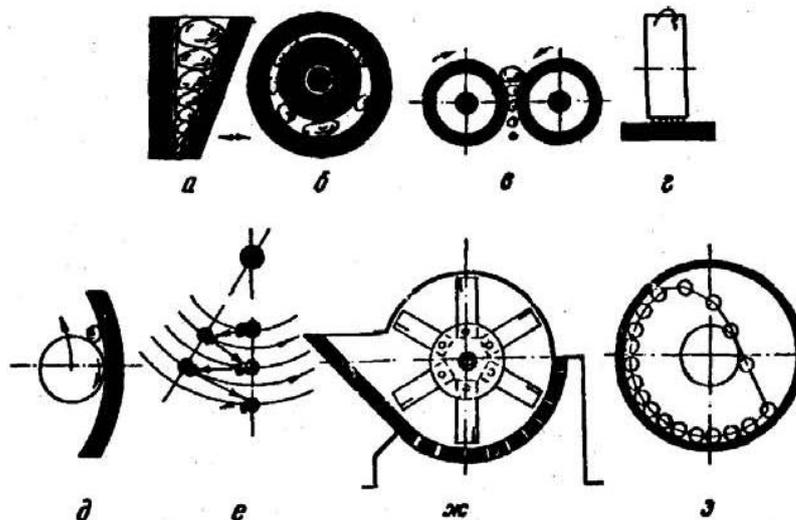


Рис. 36. Схемы дробильных машин:

*а* – щековая дробилка; *б* – конусная дробилка; *в* – дробильные валки; *г* – бегуны; *д* - мельница; *е* - дезинтегратор; *ж* – молотковая мельница; *з* – шаровая мельница.

*Щековые дробилки* периодически раздавливают материал между металлической неподвижной и качающейся поверхностью (щеками). Неподвижная щека устанавливается вертикально, подвижная - под углом к ней. Такой тип дробилок применяется для крупного, реже - среднего дробления. Их производительность достигает 1000 т/ч при размере пасти (загрузочного отверстия) 1500×2100 мм.

*Конусные дробилки* используют на стадиях крупного, среднего и мелкого дробления. Дробящие поверхности их выполнены в виде двух усеченных конусов, меньший из которых расширяющейся верхней частью входит в сужающуюся верхнюю часть большого конуса и эксцентрично движется (но не вращается) в последнем. Максимальный размер загрузочных отверстий конусной дробилки 2000 мм.

Конусные дробилки по высоте (7...10 м) значительно превышают щековые (3...5 м) и требуют более высокого здания. Их конструкция сложнее. Однако они более производительны (до 4500 т/ч руды), менее энергоемки, хорошо приспособлены к дроблению плитняка, который через

прямоугольное сечение рабочего пространства щековой дробилки может проскочить без разрушения.

*Валковые дробилки* применяют для среднего и мелкого дробления. В них материал раздавливают между двумя вращающимися навстречу друг другу гладкими, рифлеными или зубчатыми цилиндрическими валками с зазором между ними от 1 до 100 мм. Скорость вращения валков варьирует от 0,5 м/с в тихоходных конструкциях до 4...6 м/с, в быстроходных при диаметре валков до 1500 мм и производительности до 250 т/ч. Валки предпочтительнее при дроблении хрупких пород, так как дают минимальное переизмельчение материала. Их используют для дробления агломерата, кокса, марганцевых руд.

Основными параметрами, характеризующими работу валковых дробилок, являются угол захвата  $\alpha$ , частота вращения валков, их производительность и потребляемая ими мощность.

Для захвата материала валками должно соблюдаться условие:  $\alpha < 2\phi$ , где  $\phi$  - коэффициент трения материала о валок.

Предельную частоту вращения валков  $n$  (в об/мин) определяют по формуле:

$$n = 616 \sqrt{\frac{\phi}{\rho d_n D}} \quad (3-1),$$

а предельную окружную скорость вращения валков  $w$  (в м/с):

$$w = \pi D n / 60, \quad (3-2),$$

где  $\phi$  - коэффициент трения;  $\rho$  - объемная масса измельчаемого материала, кг/м<sup>3</sup>;  $d_n$  - начальный диаметр валка, м.

Обычно  $w = 2,5 \dots 5$  м/с.

Производительность вальцовой дробилки  $G$  (в кг/ч)

$$G = 60\pi D b n l \rho \psi, \quad (3-3)$$

где  $D$  - диаметр валков, м;  $b$  - ширина зазора между валками, м;  $l$  - длина валка, м;  $n$  - частота вращения валков, об/мин;  $\rho$  - объемная масса измельченного материала, кг/м<sup>3</sup>;  $\psi$  - коэффициент, учитывающий неравномерность питания валков;  $\psi = 0,5 \dots 0,7$ .

Если валки вращаются с различной частотой, то их производительность определяется по средней частоте вращения.

Мощность  $N$  (в кВт), потребляемая вальцовой дробилкой:

$$N = 0,117 D l n (120 d_n + D^2) \quad (3-4)$$

Здесь значения  $D$ ,  $l$  и  $d_n$  даны в м;  $n$  - в об/мин.

Размер поступающих на измельчение частиц должен быть в 20...25 раз меньше диаметра гладких валков и в 10...12 раз меньше диаметра рифленых валков; для дробилок с зубчатыми валками отношение  $D/d_n = 2 \dots 5$ .

*Ударные дробилки молоткового типа* разрушают отходы ударами молотков, находящихся на валу вращающегося со скоростью 800-1000 мин<sup>-1</sup> барабана. Молотки закреплены шарнирно и при ударе по куску отклоняются. Молотковые дробилки применяют для крупного дробления хрупких и

пластичных материалов (известняк, мергель, гипсовый камень, сухая глина, уголь, агломерат и др.).

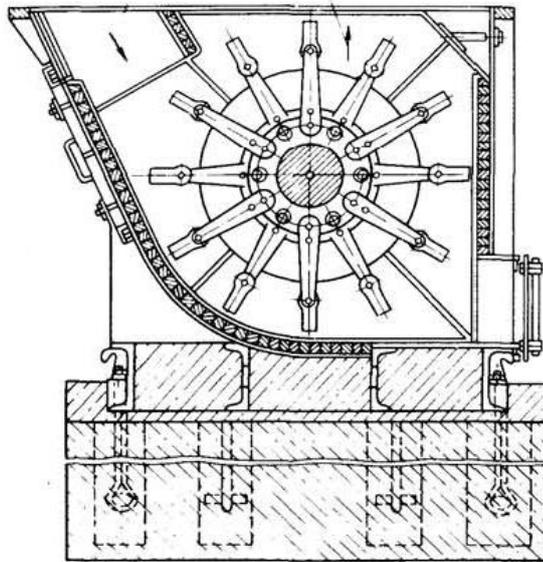


Рис. 37. Молотковая шахтная дробилка:

1 – подача компоста и частичная подача воздуха; 2 – вынос дробленого материала

*Шахтная мельница* (рис. 37) представляет собой молотковую дробилку, материал из которой эвакуируется восходящим потоком воздуха. Корпус мельницы монтируется на отдельном фундаменте и соединен с двигателем упругой муфтой. Ротор вращения - в опорно-упорных подшипниках. На роторе шарнирно закреплены билодержатели и билы. Изнутри к корпусу крепятся съемные бронеплиты. Со стороны загрузки в корпусе предусмотрены закрывающиеся люки для ревизии бил и билодержателей.

К достоинству конструкции следует отнести возможность доизмельчения недостаточно измельченных частиц, которые пневматически возвращаются в корпус мельницы. Основная сложность при эксплуатации дробилок и шахтных мельниц связана с необходимостью периодической замены изнашиваемых элементов.

В ряде случаев практикуют жесткое закрепление молотков, что обеспечивает вложение кинетической энергии всего ротора в дробление материала. Дробилки такого типа называют роторными.

Примером универсальной дробилки для промышленных отходов и бытового мусора является роторная дробилка типа РО (рис. 38). Дробилка предназначена для измельчения отходов древесины, пластмасс, обрезков листового алюминия и других металлов, затвердевших лаков и красок, упаковочной тары, резины, обрезков кабелей и т.д.

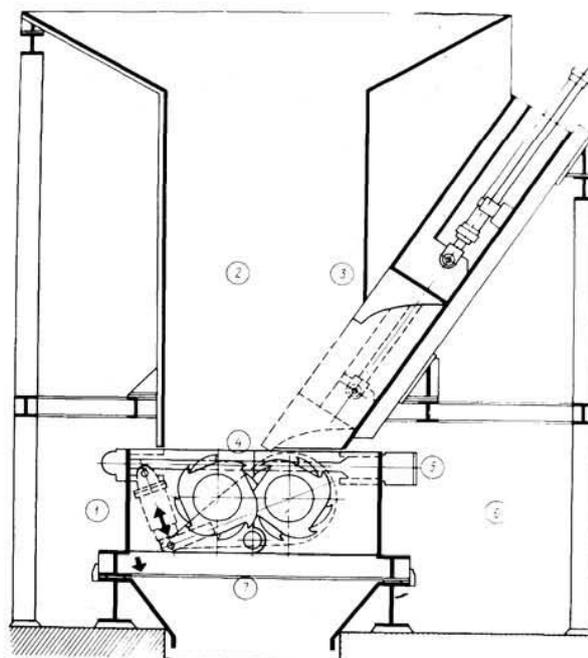


Рис. 38. Дробилка типа РО:

- 1 - корпус; 2 - бункер; 3 - гидравлический толкатель; 4 - литые валы;  
5 - противоперегрузочное устройство; 6 - полость для обслуживания; 7 –  
бункер.

На станине смонтирован корпус дробилки 1, в котором расположена пара валов 4 с выступающими заостренными кромками. Кромки одного вала входят в промежуток между режущими кромками второго. В процессе работы валы медленно вращаются навстречу друг другу. Загружаемые отходы поступают в приемный бункер 2 и прижимаются к валам 4 при помощи гидравлического толкателя 3. Захватываемый зубьями валов материал испытывает режущее, раскалывающее и разламывающее воздействие, измельчается и падает в бункер 7, откуда удаляется для классификации и дальнейшей переработки. Во избежание поломки валов предусмотрено противоперегрузочное устройство 5 в полости для обслуживания 6.

Окружную скорость вращения молотков (в м/с) определяется по формуле:

$$w = P \tau / m, \quad (3-5),$$

где  $P$  - сила удара, Н;  $\tau$  - продолжительность удара, с;  $m$  - масса измельчаемого тела, кг.

Производительность молотковой дробилки (в т/ч) определяют по формуле:

$$G = \frac{kD^2Ln^2}{3600(i-1)} \quad (3-6),$$

где  $D$  - диаметр ротора, м;  $L$  - длина ротора, м;  $n$  - число оборотов ротора в минуту;  $i$  - степень измельчения;  $k$  - опытный коэффициент, величина

которого зависит от конструкции дробилки и твердости измельчаемого материала (обычно  $k = 4,0 \dots 6,2$ ),  
или по упрощенной формуле:

$$G = 35D L\rho, \quad (3-7),$$

где  $\rho$  - объемная масса измельчаемого материала,  $\text{кг/м}^3$ .

Мощность  $N$  (в кВт), потребляемая молотковой дробилкой, может быть приближенно определена по эмпирической формуле:

$$N = (0,1 \dots 0,15) G \quad (3-8),$$

или по формуле:

$$N = 0,15 D^2 L n, \quad (3-9),$$

где  $n$  - частота вращения ротора, об/мин.

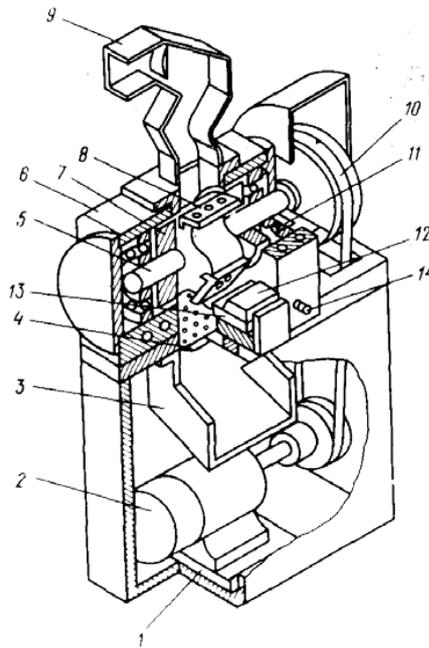


Рис. 39. Роторно-ножевой измельчитель с водяным охлаждением:  
1 - поворотная плита; 2 - электродвигатель; 3 - лоток; 4 - съемная калибрующая решетка; 5 - ротор; 6 - статор; 7 - маслоотражатели; 8 - ножи ротора; 9 - загрузочный бункер; 10 - маховик; 11 - упорные подшипники; 12 - массодробители; 13 - регулируемые ножи статора; 14 - штуцер для подачи воды.

Для получения мелкой крошки, например в процессе переработки отходов пластмасс, часто используют роторно-ножевые измельчители (рис.39). В них измельчение происходит в узком зазоре между неподвижными ножами, закрепленными внутри статора, и ножами, установленными на вращающемся роторе. Этот метод пригоден для получения крошки диаметром частиц до 2 мм, при этом размер крошки регулируется сменными решетками с различными диаметрами отверстий. В большинстве дробилок такого типа подвижные ножи смонтированы на горизонтальном роторе, и число их может меняться.

*Молотковые дробилки с горизонтальной осью* предназначены для измельчения широкого спектра отходов, включая пластмассы, жестяные банки и т.п. Отходы измельчаются в зазорах между молотками и решетками. Производительность дробилки 10...15 т/ч.

Максимальные технические характеристики ударных дробилок таковы: диаметр ротора до 1200...1450 мм, его окружная скорость до 55...70 м/с, крупность загружаемых кусков до 800...1000 мм, производительность до 400...500 т/ч.

*Дезинтеграторы* состоят из двух роторов типа беличьего колеса большего (до 1500 мм) и меньшего диаметров. Роторы вставлены друг в друга и соосно вращаются в противоположных направлениях со скоростью до 3000 мин<sup>-1</sup>. Эти аппараты используют для среднего и мелкого дробления хрупких и сравнительно мягких материалов. Ободы дезинтегратора стягивают горизонтально расположенные элементы (пальцы) из прутков круглого сечения или клиновидных.

Помимо дробления с помощью механических средств нашли применение специальные способы, основанные на различных физических явлениях, в частности разрушение материалов с помощью электрогидравлического эффекта, сжатой средой, декрипацией и др.

*Электрогидравлический эффект* основан на использовании высоковольтного разряда в жидкости. Значительная тепловая мощность, выделяемая при разряде, приводит к нагреву вещества до десятков тысяч градусов, его испарению и ионизации. Продукты разряда ведут себя подобно газообразным продуктам взрыва. Это приводит к появлению сверхвысоких гидравлических ударных волн, кавитации, ультразвукового излучения, резонансных эффектов, разрушающих материал. В качестве источника электрического разряда служат генераторы импульсов тока с емкостными накопителями энергии.

В настоящее время электрогидравлический эффект применяют в металлообработке (формование трубчатых и полых изделий, деталей из малопластичных материалов), горном деле (бурение, дробление и измельчение), сельском хозяйстве, пищевой промышленности, в процессах химической технологии, в алмазодобывающей и других отраслях промышленности.

Разрушение сжатой средой (взрывом) состоит в создании избыточного давления в кусках дробимого материала, последующей их выдержке под ним и его резком сбросе. Взрывной способ используют для разрушения таких материалов, как уголь, асбест, руда, дерево.

При высоком давлении газообразная среда (пар, воздух) проникает в поры и трещины куска, уже на этой стадии разупрочняя материал за счет адсорбционных процессов в порах, трещинах, плоскостях срастания минералов и образования микротрещин в более слабых участках. При последующем резком сбросе давления газ, расширяясь, разрушает материал.

В используемых для дробления сжатой средой установках исходный материал загружают в камеру, связанную трубопроводом, имеющим клапан,

со второй камерой, которую вакуумируют. В первой камере поднимают давление, затем сбрасывают его и одновременно открывают быстродействующий клапан. Разрушаемый материал вследствие разницы давлений в первой и второй камерах разгоняется по трубопроводу и на выходе из него в вакуум-камеру ударяется в отбойную плиту, увеличивая степень дробления, достигающую за один цикл 1,5...3,0.

Более высокая дисперсность в процессе измельчения может быть достигнута при использовании измельчителей (мельниц) других конструкций, которые основаны на ударном, ударно-режущем или ударно-импульсном действии.

Для измельчения применяют мельницы (барабанные, вибрационные, струйные) и бегуны. Более распространены барабанные конструкции.

В *барабанных мельницах* измельчение происходит при горизонтальном вращении барабана, внутрь которого загружают материал и мелющие тела - обычно стальные шары, короткие цилиндры или стержни. Внутреннюю поверхность барабана футеруют стальными или чугунными износостойчивыми плитами.

При вращении барабана мелющие тела поднимаются на некоторую высоту и падают, разбивая куски материалов. Для хорошей работы мельницы необходимо правильно выбрать частоту вращения. При слишком большой (критической) скорости вращения дробящие тела центробежной силой прижимаются к стенкам барабана и вращаются вместе с ним, не измельчая полезные ископаемые. При недостаточном числе оборотов мелющие тела перекатываются в нижней части барабана при незначительном эффекте измельчения. Оптимальная скорость составляет 75...80% критической.

Известны классификации барабанных мельниц по нескольким признакам. В зависимости от вида измельчающей нагрузки их подразделяют на стержневые, шаровые, галечные и самоизмельчения.

*Стержневые мельницы* используют на стадии грубого, а шаровые - тонкого измельчения. В галечных мельницах дробящим телом является кремниевая галька. Она применяется тогда, когда недопустимо даже небольшое загрязнение измельчаемого материала железом от истираемых шаров или стержней. В мельницах самоизмельчения специальные мелющие загрузки отсутствуют, а материал разрушается при падении и перекатывании его кусков. Крупность материала, образующегося при самоизмельчении, весьма неоднородна, и мельница должна работать в замкнутом цикле.

По форме барабана мельницы делятся на конические и цилиндрические. Цилиндрические шаровые мельницы длиной, в 3...6 раз превышающей диаметр, называют трубными. Последние могут быть одно-, двух и многокамерными. Увеличение числа камер повышает равномерность и степень измельчения материала. Первая, со стороны загрузки, камера заполняется наиболее крупными шарами, следующие - все более мелкими.

В зависимости от среды, в которой проводят измельчение, различают барабанные мельницы сухого и мокрого помола. При мокром помоле измельчение проводят в жидкой среде (обычно водной), что предупреждает

агрегацию тонких частиц, пыление материала и обеспечивает более равномерный гранулометрический состав готового продукта. Смесь твердых частиц с водой называют пульпой, густоту которой характеризуют отношением масс жидкого и твердого (ж:т) обычно равным 0,40...0,75 или массовым процентом твердого. Воду в мельницу подают через полую цапфу на одном из торцов барабана, а на противоположном конце через цапфу сливают пульпу. При сухом измельчении материал из мельницы разгружают по ее периферии через решетку. Желаемая степень измельчения в обоих случаях достигается регулированием производительности мельницы и массой мелющей загрузки.

По схеме измельчения материала мельницы разделяют на работающие в открытом и замкнутом циклах. В последнем случае производится классификация измельчаемого материала по крупности, и недоизмельченная его часть возвращается в мельницу. Замкнутый цикл обеспечивает большие степень и равномерность помола материала, но снижает производительность оборудования.

Современные барабанные мельницы отличаются крупными габаритами и высокой единичной мощностью. Диаметр и длина барабанов стержневых мельниц достигают 4×11 м, шаровых трубных - 4,5×16 м, шаровые мельницы при сухом измельчении и воздушной классификации материала имеют диаметр до 8,5 м. Производительность стержневого агрегата в открытом цикле - до 9 тыс.т в сутки. Скорость вращения мельницы большого диаметра не превышает 12 мин. Мелющая загрузка равна 40...50% объема аппарата и представляет собой стержни и шары диаметром соответственно 75...100 и 30...120 мм.

Число оборотов мельницы (об/мин) принимают равным 75 % от критического числа оборотов:

$$n = \sqrt{\frac{1800}{D}} = \frac{42,4}{\sqrt{D}}$$

и определяют по формуле:

$$n = \frac{32}{\sqrt{D}} \quad (3-10),$$

где D – внутренний диаметр барабана мельницы, м.

Размер шаров (мм), загружаемых в барабан, зависит от наибольшего размера кусков питания  $d_n$  и размера частиц измельченного продукта  $d_k$  и может быть определен по формуле:

$$D_{ш} = 6(\lg d_k) \sqrt{d_n} \quad (3-11).$$

Производительность мельницы (т/ч) рассчитывается на выход частиц определенной крупности и может быть ориентировочно определена по формуле:

$$G = K V D^{0,6}, \quad (3-12),$$

где K – коэффициент, определяемый по табл. 3.1; V – объем барабана, м<sup>3</sup>.

Расход энергии (кВт) на измельчение приближенно вычисляется по формуле:

$$N = 6,1m_{ш}\sqrt{D} (3-13),$$

где  $m_{ш}$  – масса шаров, т.

К достоинствам барабанных конструкций относятся высокая степень и легкость регулирования помола, однородность готовой продукции, простота и надежность. Их недостатки - большие расходы энергии и габариты, металлоемкость, значительный уровень шума во время работы.

*Вибрационные и струйные мельницы* предназначены для сверхтонкого помола материалов (до нескольких микрон и менее).

Принцип действия вибромельницы заключается в том, что материал и мелющие тела загружают в барабан, которому сообщают колебательные движения с ускорением, значительно превосходящим ускорение силы тяжести. Это ускорение передается мелющим телам, что значительно интенсифицирует разрушение материала. Частота колебаний составляет 25...50 мин<sup>-1</sup>, их амплитуда равна 2...4 мм.

Принцип действия *струйных мельниц*, состоит в самоизмельчении частиц материала, двигающегося с большой скоростью (до нескольких сотен метров в секунду) в воздушном потоке по пересекающимся или встречным направлениям. Их используют в тех случаях, когда недопустимо загрязнение конечного продукта металлическими примесями. Наиболее распространены противоточные струйные мельницы. В них сжатый воздух или перегретый пар поступает по трубопроводу в эжектор, захватывает материал, разгоняет его в трубе и с большой скоростью вдувает в камеру навстречу другому потоку. Измельченный материал передается в сепаратор, из которого мелкая фракция уносится в осадительные устройства и используется, а крупная возвращается на домол. Производительность струйной противоточной мельницы достигает 300 кг/ч.

Измельчение материалов в *бегунах* является одним из наиболее давних способов. Оно реализуется за счет раздавливающих и истирающих нагрузок, возникающих при качении тяжелых жерновов по твердой кольцеобразной плите. Бегуны используют для измельчения, с одновременным растиранием и перемешиванием, вязких и мягких пластичных масс (сухой и увлажненной глины, шамота, распушки асбеста, приготовления формовочных смесей и т.п.) и для грубого помола (не тоньше 0,1 мм) других материалов. Они могут работать в сухом и мокром вариантах измельчения, непрерывно и периодически, но, как правило, в открытом цикле. Самые мощные бегуны мокрого измельчения имеют катки диаметром и шириной 1800×800 мм, чаши диаметром до 3,6 м в виде кольцевого желоба, скорость вращения 10...15 мин<sup>-1</sup>, производительность до 43 т/ч.

При необходимости получения особой тонины помола, например, в конечной стадии процесса регенерации лакокрасочных отходов, применяют *ударно-истирающие измельчители*.

На рис. 40 показана вибрационная мельница с внутренним вибратором, предназначенная для измельчения материалов с исходным размером частиц 1...2 мм до 1...5 мкм. Высокая степень измельчения и такая дисперсность продуктов измельчения достигаются как за счет самого способа обработки

(удар с истиранием), так и за счет состояния материала в измельчителе. Частицы материала все время находятся во взвешенном состоянии и вибрируют. За счет соударения вибрирующих шаров, заполняющих корпус мельницы, а также их взаимного перемещения происходит интенсивное измельчение поступающего в корпус материала.

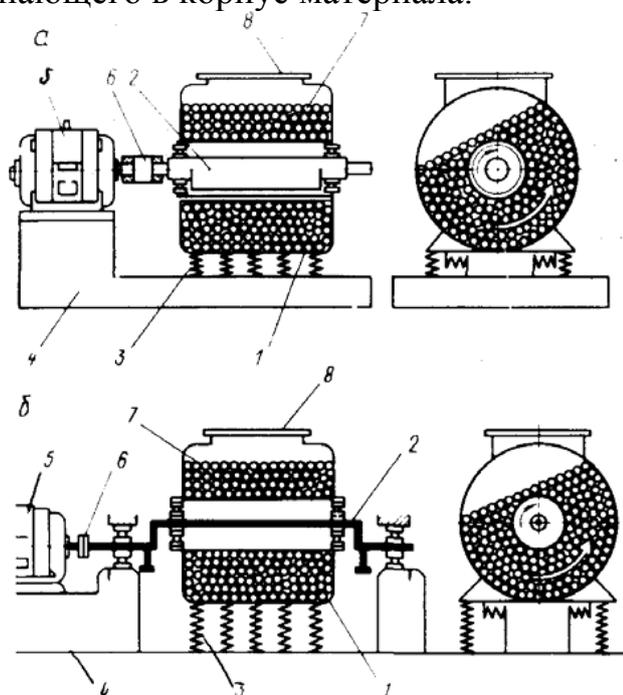


Рис. 40. Схема вибрационной мельницы с внутренним вибратором:  
*а* – инерционным; *б* - вибрационным; 1 – корпус; 2 - вибратор; 3 - опоры; 4 - рама; 5 – электродвигатель; 6 - муфта; 7 - мелющие тела (шары); 8 – люк.

Более тонкую степень помола (порядка единиц или даже долей мкм) можно получить только в *коллоидных мельницах* различных вариантов. Коллоидная мельница – это система, построенная по принципу ротор-статор, где эмульгируемая среда обрабатывается трущимися частями мельницы. Дисперсность получаемых в ней смесей прямо пропорциональна скорости вращения и времени обработки. Исследования показали, что устойчивость получаемых в коллоидной мельнице эмульсий обратно пропорциональна величине рабочей щели между конусами, ее увеличение во многом снижает эффективность эмульгирования. В связи с этим для получения в коллоидных мельницах более высокодисперсных эмульсий целесообразно увеличивать коэффициент трения или уменьшать величину зазора, что в прочем, одно и то же. Однако следует учитывать тот факт, что при работе на малых зазорах заметно снижается производительность коллоидной мельницы.

Материал измельчается в несколько стадий: первоначально при многократном соударении с пальцами ротора и статора дисмембратора мельницы. Впоследствии измельчается режущей гарнитурой дисков ротора и статора, с одновременным воздействием на него гидродинамических эффектов - разрывающих касательных напряжений и кавитации, возникающих в несущей фазе.

Как и для дробления, для измельчения, помимо механических средств, используют специальные способы, основанные на различных физических явлениях, в частности на электрогидравлическом эффекте, разрушении взрывом.

Один из недостатков, возникающих при измельчении вязких, упругих и вязкоупругих материалов (резина, некоторые виды термопластов и др.), заключается в том, что при комнатной температуре энергозатраты на их переработку очень велики, хотя непосредственно на измельчение расходуется не более 1 % энергии, основная же ее часть преобразуется в теплоту.

Поэтому в последние 15...20 лет все большее применение находит техника криогенного измельчения, которая позволяет охлаждать материал ниже температуры хрупкости. Как правило, в качестве охлаждающего агента используют жидкий азот, имеющий температуру - 196°C, что ниже температуры хрупкости большинства полимерных материалов. При таком способе дробления резко возрастает степень измельчения, повышается производительность процесса, снижаются удельные энергозатраты, предотвращается окисление продукта.