Л. П. Зарогатский

ПЕРЕРАБОТКА ТВЕРДЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ. ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ

Санкт-Петербург
2005 г.

L. P. Zarogatsky

RECYCLING OF SOLID INDUSTRIAL WASTES. EQUIPMENT AND TECHNOLOGIES

Saint-Petersburg
2005

УДК

Л. П. Зарогатский. Переработка твердых промышленных отходов. Оборудование и технологии.

ISBN

Промышленные отходы зачастую могут быть более богаты полезными компонентами, чем руды, однако их переработка является более сложным процессом и требует специальных технологических приемов и оборудования.

В книге приведены новые технологии переработки промышленных отходов по отраслям промышленности с использованием наиболее эффективного оборудования, в том числе принципиально нового.

Приведены примеры технологий, обеспечивающих полную утилизацию отходов с высокой рентабельностью.

Ил. 158, табл. 102, список литературы 15 названий.

L. P. Zarogatsky. Recycling of solid industrial wastes. Equipment and technologies.

Industrial wastes can often be richer in useful components than ores, but recycling of them is more difficult process wich requires special technological methods and equipment.

The book presents new technologies for processing industrial waste by industrial sectors, using the most efficient equipment, including essentially new ones.

Examples of technologies are provided that ensure complete waste recycling with high profitability.

Ill. 158, tables 102, references 15.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

ВВЕДЕНИЕ 6

I ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ 10

1.1. Основы дезинтеграции твердых материалов 10
1.2. Дробилки 22
1.3. Мельницы 47
1.4. Грохоты 55
1.5. Магнитные сепараторы 65
1.6. Электрические сепараторы 78

II ПРОМЫШЛЕННЫЕ ОТХОДЫ И ИХ ПЕРЕРАБОТКА 94

2.1. Извлечение цветных и редких металлов методами биотехнологий из отвалов горно-обогатительных комплексов 94
2.2. Переработка металлургических шлаков 104
2.3. Регенерация огнеупоров 131
2.4. Регенерация литейных песков 145
2.5. Утилизация отходов производства керамики 172
2.6. Регенерация отработанного абразивного инструмента 188
2.7. Переработка металлической стружки 247
2.8. Переработка отходов твердосплавного и алмазного инструмента 304
2.9. Переработка платиносодержащих катализаторов 324
2.10. Переработка лома электротехнической и радиотехнической аппаратуры 343

2.11. Регенерация некондиционных продуктов порошковой технологии 361
2.12. Регенерация изношенных резиновых изделий 389
2.13. Переработка отходов углеродных изделий 405
2.14. Переработка отходов древесины 413
2.15. Биопереработка отходов и побочных продуктов сельского хозяйства и промышленности 436
2.16. Производство энергии из отходов биомассы при помощи микроорганизмов 448

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 470

ЛИТЕРАТУРА 472

ВВЕДЕНИЕ

К концу XX века человечество накопило такое количество техногенных отходов, что их можно условно назвать новыми месторождениями полезных ископаемых, зачастую содержащими больше полезных компонентов, чем природные месторождения.

Например, гражданский электронный скрап содержит от 70 до 150 г золота на тонну скрапа, что, как минимум, в 20 раз больше, чем в руде. Причем золото извлекается в более полном объеме и со значительно меньшими затратами чем из руды, и при этом попутно получают другие драгоценные и цветные металлы.

Большинство отходов относится к возобновляемым ресурсам, что неизбежно приводит к снижению эксплуатации природных источников.

Металлолом, шлаки, стружка, абразивы, огнеупоры – все это после переработки становится более дешевым сырьем, чем продукт, полученный из недр. Сельскохозяйственные отходы и древесину можно переработать в корма или этанол, который является возобновляемым, более дешевым и экологически более чистым топливом, чем производные нефти.

Причиной недостатка должного внимания к переработке разнообразных отходов является отсутствие в этой области эффективного технологического оснащения. Ведь различные компоненты отходов требуют своего способа дробления, классификации и сепарации. Поэтому попытки комплектации перерабатывающих заводов специальным оборудованием не универсального действия приводили к крайне высоким капитальным затратам и обуславливали их нерентабельность.

Любые промышленные отходы должны быть измельчены, расклассифицированы и отсепарированы. Только в этом случае выделенные компоненты могут быть реализованы и принесут прибыль. Однако традиционное оборудование для этих процессов безнадежно устарело и требует новых идей для его совершенствования.

Самыми распространенными процессами, как для переработки сырья, так и отходов, являются дробление и измельчение. Вообще в современном индустриальном производстве эти процессы поглощают около 20 % электроэнергии, вырабатываемой человечеством.

Такие большие затраты электроэнергии объясняются тем, что в современных дробильно-измельчительных машинах применяются процессы разрушения, освоенные еще первобытным человеком: сжатие, удар, истирание, резание. При таком воздействии материал разрушается беспорядочно, почти без использования имеющихся в нем микротрещин и других дефектов структуры. Кроме бесполезных затрат энергии существующие дробильно-измельчительные процессы приводят к безвозвратным потерям полезных компонентов или к существенному ухудшению свойств производимых из них продуктов из-за неполного измельчения или наоборот, переизмельчения, окатывания или повреждения частиц.

Например, при переработке шлаков или металлических отходов по этим причинам теряется до 15–30 % металла. Этот недостаток относится и к извлечению драгоценных металлов из рудных отвалов. Полезные компоненты в виде тонких частиц безвозвратно уходят в хвосты.

Наиболее крупными в мире производителями отходов являются лесоперерабатывающие, пищевые и сельскохозяйственные производства. Отходы этих производств содержат от 10 до 40 % белка, фосфаты, углеводы и другие полезные компоненты. Ежегодно в мире при переработке древесины только на лесосеках остается около 400 млн. т отходов, из которых можно получить 100 млн. т этанола (спирта). Этого объема достаточно, чтобы в США и странах Западной Европы полностью отказаться от нефтяных видов топлива. Если источником этанола сделать и сельскохозяйственные отходы, что проще и эффективнее, чем получать его из лесотехнических, то он может стать единственным и экологически чистым энергоносителем в мире.

При переработке отходов древесины или макулатуры методом резания и разрывания в дисковых мельницах существенно укорачиваются и повреждаются волокна, что не позволяет сделать бумагу более прочной и тонкой, а большая часть энергии затрачивается бесполезно. При производстве кормов из растительных и животных отходов оболочки большинства клеток не раскрываются, поэтому усвояемость полезных компонентов клеток не превышает 70 %, что резко снижает их пищевую ценность.

При производстве дорожного щебня уходит в отсевы почти 40 % гранита – это тоже не только потеря энергии, но и потеря ресурсов.

Переработка промышленных отходов существенно усложняется в одних случаях из-за неселективности разрушения, в других – из-за необходимости использования термических методов, химических реагентов и воды.

Созданные новые вибрационные измельчительные машины могут объединяться с грохотами, конвейерами, элеваторами и сепараторами (магнитными, электрическими, гравитационными и пневматическими) в комплектные линии для переработки различных отходов. Такие линии имеют в два-три раза меньшее энергопотребление и занимаемые площади, не требуют фундаментов и дозаторов, расход материала мелющих тел в них несколько ниже, чем в традиционных современных линиях. В большинстве случаев исключаются термические и химические процессы переработки.

Линии могут иметь микро- и макроразмеры, производительность до миллионов тонн в год и способны перерабатывать материалы любой прочности: бумагу (в том числе с полиэтиленовым покрытием), корма, пищевые продукты, регенерировать литейные пески, шлаки, металлическую стружку, абразивные круги, огнеупоры, отходы керамических изделий, автопокрышки, железобетон, электронику, отходы производства пластмассовых изделий и т. д.

В книге приведено описание современного и наиболее эффективного оборудования для переработки отходов, а также его сопоставительные данные с традиционно используемыми в мировой практике машинами.

Кроме того, приведены описания технологического применения комплектных линий, составленных из упомянутых машин для переработки промышленных отходов.

I ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ

1.1. Основы дезинтеграции твердых материалов

Развитие процессов дезинтеграции различных твердых материалов уже длительное время идет в основном по пути усовершенствования механических способов дробления и измельчения. При всем принципиальном различии физических эффектов, положенных в основу известных промышленных способов дробления и измельчения, их организация сводится к созданию в разрушаемом объекте поля деформаций и напряжений, превышающих предельные прочностные характеристики материала, и направленных на разрыв связей кристаллической решетки с образованием поверхности разрушения. Нарушение сплошности кристаллической решетки требует приложения очень высоких нагрузок. Для кристаллических оксидов, например, теоретически это соответствует 10–50 ГПа. К моменту разрушения подобный уровень энергии должен быть накоплен между слоями атомов, непосредственно прилегающих к поверхности разрушения. Полезно затраченной считается лишь та энергия, которая существует после разрушения в виде свободной энергии новой поверхности. Поскольку деформационное поле создается во всем объеме куска, потенциальная энергия деформации лишь в минимальной доле, сосредоточенной вблизи поверхности разрушения, затрачивается полезно. Подавляющая же часть остальной энергии рассеивается в виде тепла. Поэтому коэффициент полезного действия дробления и измельчения при современной их организации не превышает нескольких процентов.

Существующие теоретические представления закономерности процессов дробления и измельчения базируются на положениях классической механики сплошной среды. При этом не учитывается, что реальные материалы состоят из многих разнородных фаз. В горных породах ими являются кристаллические блоки различных минералов, в металлических и

керамических материалах – кристаллиты, на поверхностях раздела которых происходит резкое изменение изотропности свойств.

В принципиальных конструктивных решениях традиционного дробильно-измельчительного оборудования эти существенные факторы во внимание не принимаются. Так, в большинстве промышленных машин используются сжимающие нагрузки. Между тем, горные породы и другие твердые материалы, как правило, имеют высокую прочность на сжатие. Поэтому даже наиболее тяжелые машины с жесткой кинематической схемой, установленные чаще всего на мощных фундаментах, не могут разрушать особо прочные материалы. Нагрузка, как правило, сосредоточена на каждом отдельном куске материала по одной оси. Это обусловливает низкую степень сокращения размеров за один цикл и многостадиальность процесса. Место приложения нагрузки является случайным, вследствие чего наблюдается неселективное интеркристаллитное разрушение. Энергия тратится не только на развитие имеющихся на пути приложения нагрузки зародышевых трещин, но и на разрыв связей на неразупрочненных участках кристаллической решетки, что приводит к излишним энергозатратам.

Анализ показывает, что прогресс в развитии теории энергетически экономного разрушения прочных материалов связан, наряду с дальнейшим развитием механики разрушения, с привлечением новых теоретических представлений физики и механики разрушения твердого тела на атомно-молекулярном уровне. Новый научный подход к проблеме прочности деформируемого твердого тела с учетом его неоднородности и наличия несовершенств («дефектов») внутреннего строения сложился сравнительно недавно с целью создания особо прочных конструкционных материалов. Он заключается в разработке научных принципов, исключающих образование в местах дефектов зародышевых трещин, ведущих к разрушению материала.

Этот подход должен развиваться в следующем направлении: как на основе дефектов структуры материала на атомно-молекулярном уровне вызвать образование зародышевых трещин на поверхности раздела фаз и

осуществить разрушение преимущественно по межфазной поверхности. При такой физической организации процесса разрушению могут подвергаться материалы со сколько угодно высокими прочностными характеристиками, без излишнего переизмельчения кристаллов или кристаллитов и, следовательно, с минимальными затратами энергии, с высокой степенью сокращения за один рабочий цикл в аппаратах, не требующих создания высокого уровня усилий.

Для разработки теоретической модели процесса разрушения, которая создавалась на основе минерального объекта, наряду с макрохарактеристиками, описывающими его прочностные свойства как куска твердого тела, введены характеристики, определяющие свойства слагающих его кристаллов.

Под механической прочностью понимается способность твердого материала разрушаться под действием напряжений (внутренних или внешних) по дефектам структуры. Эта величина определяется соотношением интер- и транскристаллитной прочности. Интеркристаллитная прочность характеризуется напряжением, при котором разрушение руды происходит по границам зерен минералов. Транскристаллитная прочность определяется напряжением, при котором разрушение происходит исключительно по объему кристаллов, а не по границам фаз. Для моделей идеальных кристаллов интеркристаллитная прочность обусловлена энергией связи атомов на поверхности раздела. Транскристаллитная прочность определяется энергией кристаллической решетки. Однако практический характер разрушения (транс- или интеркристаллитный) будет контролироваться не только соотношением механических свойств граничащих фаз и характером границ срастания, но и более тонкими механизмами, на уровне структурных искажений кристаллической решетки минералов [8].

Процесс разрушения твердого тела многостадиален. Он начинается в дефектных местах срастания кристаллических блоков, где имеются нарушения их периодичности, и последовательно проходит следующие стадии:

– скопление дефектов, приводящее к локальной концентрации напряжений;

– образование зародышевых микротрещин, т. е. разрыва сплошности соединения кристаллических блоков на отдельных участках;

– развитие и объединение зародышевых микротрещин вплоть до образования магистральной трещины разрушения;

– разрушение твердого тела на несколько частей.

Рациональная организация процесса разрушения, таким образом, должна предусмотреть оптимальные условия для последовательного протекания каждой из указанных стадий. Низкий к.п.д. существующих процессов дробления и измельчения можно объяснить тем, что в большинстве случаев эти оптимальные условия и последовательность стадий не соблюдаются.

Действие внешней нагрузки может перемещать этот дефект из одного участка кристаллического блока в другой и в конечном итоге, если на пути перемещения не встречается препятствий, вывести дислокацию на поверхность, на которой образуется ступенька (рис. 1) [7]. К такому беспрепятственному перемещению дислокаций (в крайне схематичном виде) сводится механизм пластической деформации.

Экспериментально установлено, что все чистые однородные монокристаллы вследствие существования дислокаций испытывают пластические деформации при напряжении, по крайней мере, на четыре или пять порядков ниже расчетного модуля сдвига этих кристаллов. Они имеют низкую прочность, а перед разрушением испытывают значительную пластическую деформацию, на которую затрачивается основная часть энергии, сообщаемой телу.

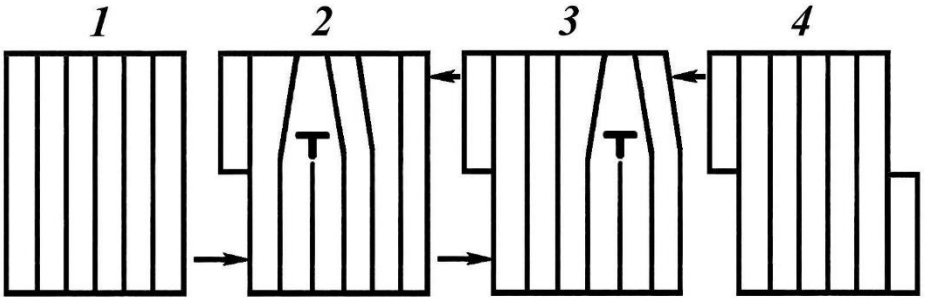


Рис. 1. Возникновение и перемещение дислокации под действием внешней нагрузки:

1 – дислокация отсутствует; *2* – появление дислокации; *3* – движение дислокации; *4* – выход дислокации на поверхность кристалла.

У большинства твердых материалов разрушение имеет преимущественно хрупкий характер, но все они (особенно металлы и пластмассы) обладают и некоторой пластичностью, которая в ряде случаев довольно значительна [8].

Когда в деформированном теле появляется трещина, оба ее края расходятся на некоторое расстояние. При этом материал, непосредственно примыкающий к краям трещины, релаксирует, напряжения в нем уменьшаются, и упругая энергия освобождается. Область релаксированной части блока будет приблизительно соответствовать по площади квадрату со стороной, равной длине или глубине трещины. Следовательно, освобожденная энергия пропорциональна квадрату длины трещины или глубины ее проникновения в кристалл. Энергия, которая необходима для образования двух новых поверхностей, пропорциональна длине трещины в первой степени. Таким образом, мелкая трещина для своего роста должна больше потреблять поверхностной энергии, чем производить свободной энергии вследствие релаксации напряжений, что определяет ее устойчивость.

Однако если трещина под влиянием приложенного напряжения начнет развиваться, картина меняется на противоположную. С ростом размеров трещины освобожденная энергия увеличивается быстрее, поскольку она

пропорциональна квадрату длины трещины. При определенной критической длине трещина начинает производить больше энергии, чем потреблять. Тогда она с огромной скоростью может рвануться вглубь и, разветвляясь, образует поверхность разрушения.

Представление о разрушении как о процессе, состоящем из образования и последующего роста трещины, появилось вследствие того, что обычно наблюдаемые значения предела прочности 10–1000 МПа существенно отличаются от теоретических значений, рассчитанных по силе межатомных связей и составляющих 10–100 ГПа. Гриффитс предположил, что разница между теоретической и действительной прочностью твердых тел является следствием наличия в них микротрещин, у которых происходит сильная концентрация напряжений. Таким образом, напряжение, при котором происходит разрушение, действительно равно теоретической прочности, но возникает в некоторых малых участках еще тогда, когда среднее возникшее напряжение невелико. С помощью многих опытов наглядно показано, что в твердых хрупких телах действительно имеются трещины, понижающие их прочность по сравнению с теоретической, и что они обычно находятся на поверхности тела. Отсюда следует, что прочность твердых тел можно значительно повысить, воспрепятствовав развитию микротрещин. Наиболее надежный способ для этого – приложение сжимающих напряжений. Этот теоретический вывод широко используется на практике для направленного упрочнения материала. Так, известно, что стекло упрочняется после закалки его поверхности с помощью предварительного нагревания при высоких температурах и обдува воздухом. В этом случае уменьшение в объеме внутренних частей стекла при его охлаждении приводит к возникновению сжимающего напряжения в уже более холодных и твердых поверхностных слоях, что препятствует развитию опасных поверхностных трещин.

Логика подсказывает, что обратный процесс – разрушение твердых тел – наиболее рационально организовать так, чтобы были созданы условия для благоприятного развития микротрещин. Между тем, большинство

промышленных процессов дробления и измельчения основано на использовании сжимающих нагрузок, что является основной причиной высокой энергоемкости и низкой технологической эффективности этих процессов при современной организации.

Можно определить, как целесообразно организовать процесс дробления твердых материалов в соответствии со сформулированными выше требованиями. Из изложенного следует, что, прежде всего, для создания потенциальных условий зарождения микротрещин кристаллическая решетка твердого тела должна быть в достаточной степени дефектна, т. е. необходимо определенное число линейных дефектов-дислокаций с одной стороны, и с другой стороны – точечных, поверхностных и трехмерных дефектов, с которыми могли бы взаимодействовать дислокации (рис. 2 и рис. 3). Далее, желательно, чтобы концентрация дефектов была больше в межзерновых участках, так как при этом можно было бы рассчитывать на преимущественное развитие микротрещин на контактах между минеральными зернами.

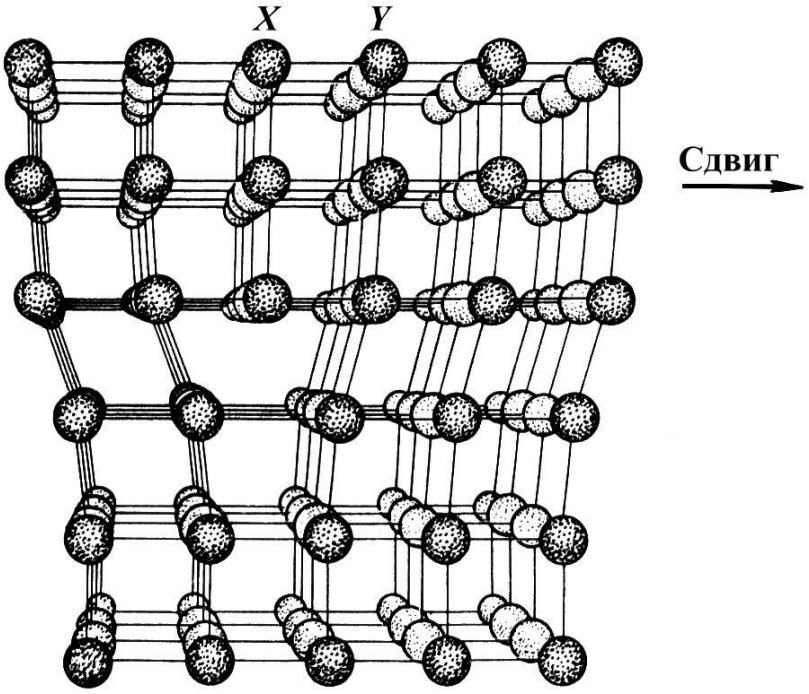


Рис. 2. Краевая дислокация в разрезе.

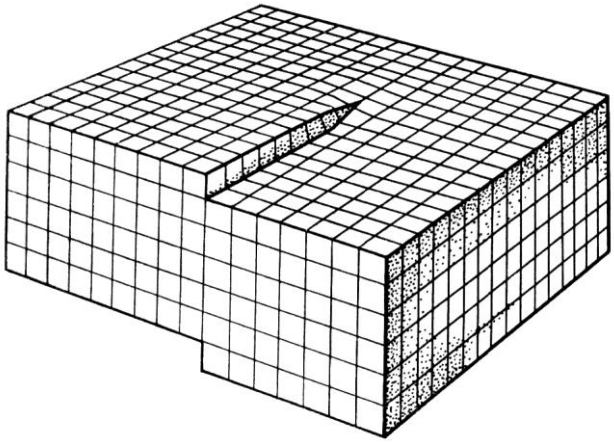


Рис. 3. Винтовая дислокация.

В большинстве случаев эти необходимые начальные условия уже созданы природой. Дефектность кристаллической решетки отходов горных пород обусловлена их петрогенезисом. Неравновесное затвердевание магмы сопровождается возникновением большого количества различного рода дефектов решетки. Неравномерное распределение примесей и большое количество геометрических несовершенств решетки в твердой фазе после кристаллизации обусловливает термодинамически неустойчивое состояние затвердевшего объема. Дефектность кристаллической решетки еще более увеличивается в процессе последующего метаморфизма. Причем именно на межзерновых поверхностях наблюдается наиболее высокая концентрация дислокаций, а также примесных и иного рода дефектов, с которыми они могут взаимодействовать. Что касается дефектности структуры твердых отходов искусственного происхождения, то дополнительной ее причиной являются условия промышленного использования.

На границе раздела между зернами создается некоторое несоответствие, которое эквивалентно размещению между кристаллами ряда дислокаций (рис. 4).

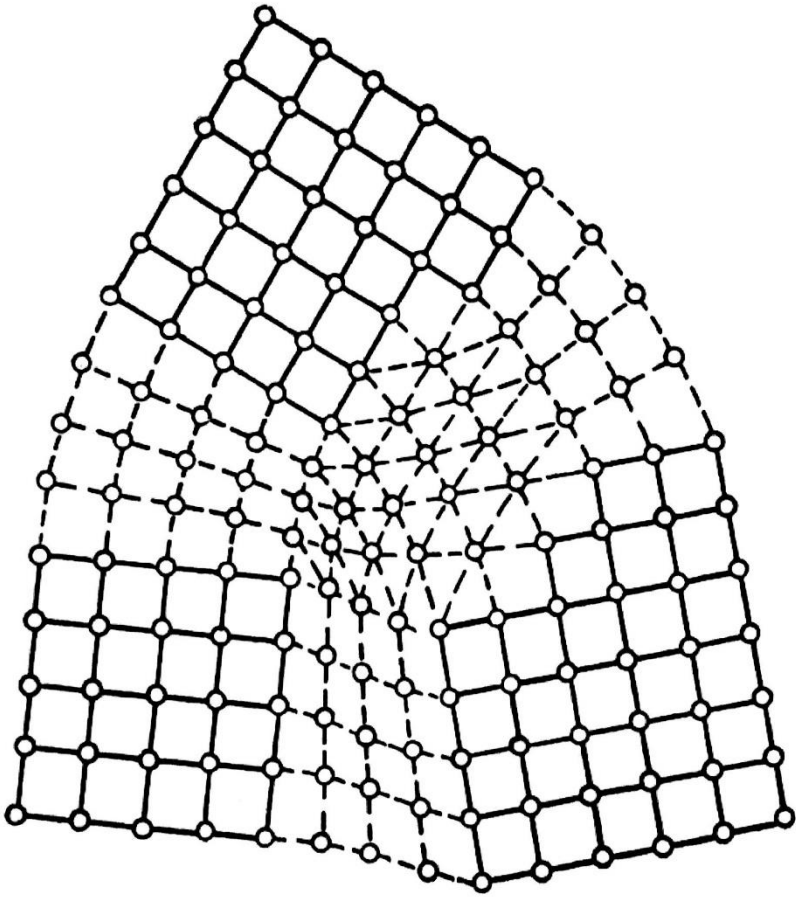


Рис. 4. Искажение структуры кристаллического блока минералов на границах зерен.

В реальных минералах на границах раздела происходит также сегрегация примесей. Это явление обусловлено двумя причинами: во-первых, атомы, находящиеся в твердом растворе, более легко могут входить в искаженные участки границ, чем в объем кристалла, поскольку в первом случае не нужно затрачивать энергию на упругую деформацию решетки; во-вторых, некоторые компоненты могут привести к образованию новых фаз у беспорядочной границы, что более выгодно, чем их нахождение в твердом растворе в кристалле.

Следовательно, в большинстве случаев границы зерен в поликристаллическом куске минерала являются именно теми дефектными зонами, которые подготовлены природой для образования зародышевых микротрещин. Нужно лишь создать соответствующие условия.

При приложении вызывающих деформацию нагрузок разрушение начинается в местах микротрещин путем развития их в магистральные трещины. Процесс развития и перехода микротрещин в макротрещины во многом зависит от характера напряжений в данном месте. Микротрещина может развиваться только под действием растягивающих или сдвиговых напряжений. Сжимающая нагрузка, наоборот, способствует ее смыканию. Следовательно, если на границах зерен твердых материалов создать растягивающие или сдвиговые напряжения, в этих зонах можно ожидать избирательного развития микротрещин, а не беспорядочного разрушения зерен. Очевидно, многое будет зависеть от интенсивности нагрузки и ее изменения во времени.

Технические приемы реализации разупрочнения межфазных границ делают организацию процесса селективного разрушения принципиально отличной от традиционных способов:

а) в отличие от одноосного сжатия или удара кусков при традиционных способах, куски материала должны подвергаться всестороннему сжатию в объемном слое материала;

б) одновременно для инициирования напряжений на границах кристаллов или кристаллитов куски должны подвергаться комбинированному нагружению, включающему элементы сдвига, изгиба, кручения и, если это механически удается осуществить, растяжения.

в) для всех способов, независимо от вида энергии, вызывающей деформацию, важно, чтобы уровень (точнее, мощность) энергетического воздействия на каждый в отдельности кусок минерала была достаточной для образования микротрещин на межзерновых границах, но не в объеме кристаллов. Например, это можно достигнуть, подвергая кусок многократному воздействию малыми импульсами энергии, вызывающими накопление необратимых деформаций на межзерновых границах;

г) частота таких воздействий и скорость нагружения также имеют большое значение, скорость нагружения должна быть достаточно высокой, чтобы снизить потери энергии на пластическую деформацию.

Частота воздействия должна соответствовать масштабным размерам кристаллических блоков или кристаллитов. Она должна быть достаточно низкой при разрушении железобетона, когда зародышевые трещины генерируются на поверхности элементов арматуры и бетона и достаточно высокой при разрушении прочных шлаков, отходов инструмента и абразивов.

Вторая стадия, т. е. непосредственно процесс разрушения предварительно разупрочненных кусков минерала, также должна осуществляться с соблюдением ряда принципов, вытекающих из предложенной модели;

д) в промежутках между циклами нагружения куски должны приобретать относительную подвижность, обеспечивающую их взаимную переориентацию, удаление разрушенных частиц, а также возможности управления плотностью слоя;

е) уровень усилий, которые требуются для создания стартовых напряжений, вызывающих развитие микротрещин в макротрещину, должен быть естественно выше энергетических импульсов в процессе разупрочнения. Однако они не должны превышать предел, при котором начинается интеркристаллитное разрушение.

Прочность межзерновых границ для различных кусков минерала будет всегда колебаться в определенном диапазоне. Поэтому, когда необходима особо высокая селективность раскрытия, процесс разрушения должен быть организован таким образом, чтобы материал подвергался постепенно нарастающему уровню энергетического воздействия с выведением из процесса раскрытых зерен. В этом случае гарантируется максимально полное раскрытие при минимальном переизмельчении.

Эти условия могут достигаться либо разделением рабочей камеры на две части, либо подбором соответствующего профиля таким образом, чтобы

уровень воздействий возрастал по мере прохождения материала по заданной программе;

ж) соотношение сжимающих и комбинированных видов нагружений, скорость и частота нагружения должны выбираться в зависимости от характера материала и поставленной технической задачи. Такая возможность плавной регулировки должна быть заложена в конструкции машины.

Как показала экспериментальная проверка, только совокупное использование всех изложенных принципов обеспечивает создание процесса, который может служить для селективного разрушения особо прочных материалов с минимальными энергетическими затратами. Селективное разрушение кроме существенной экономии энергии, обеспечивает наиболее полное извлечение полезных компонентов из отходов, а также оптимальный гранулометрический состав продукта.

Изложенные выше теоретические принципы рационального разрушения твердых тел наиболее полно удалось воплотить в конструкциях виброинерционных машин (конусных инерционных дробилок) при соответствующем режиме их настройки.

Процесс дезинтеграции определяет уровень экономической эффективности переработки твердых отходов. Однако от последующих процессов классификации измельченных отходов по крупности и процессов обогащения также зависит коммерциализация регенерата. В последующих главах приведено описание оборудования для переработки твердых отходов.

1.2. Дробилки

Твердые отходы отличаются весьма контрастными физическими свойствами: от пластмасс и литейных песков до металлургических шлаков и твердосплавного инструмента. Значительная часть отходов, например строительных, не превышает по прочности минералы, поэтому для их переработки можно использовать традиционные дробилки, памятуя о содержании в этих отходах крупных недробимых металлических включений.

Термические свойства пластмасс, упругость резиновых отходов, многокомпонентность автомобильного лома, абразивность электрокорунда и сверхпрочность отходов режущего инструмента требуют отдельного подхода к выбору дробильного оборудования для каждого вида отходов.

Общее количество материалов, ежегодно подвергаемое в нашей стране дезинтеграции, составляет 3 млрд. тонн. Из них одна треть – это отходы, наибольшая доля которых производится строительной, горнометаллургической и деревоперерабатывающей отраслями промышленности. Твердые бытовые отходы составляют в годовом объеме 30 млн. тонн.

Однако в XX веке в переработку вовлекалось не более 10 % образующейся массы твердых промышленных отходов. Поэтому к настоящему времени их скопилось десятки миллиардов тонн.

Если ежегодно перерабатывать хотя бы 50 % образующихся в стране промышленных отходов, то потребуется почти 500 тыс. тонн дробильно-измельчительного оборудования, так как на каждый миллион тонн отходов необходима одна тысяча тонн такого оборудования.

Это объясняется тем, что процессы дробления и измельчения такого сложного сырья, как правило, являются многостадиальными и по существу похожи, и даже в ряде случаев аналогичны процессам обогащения горнорудного сырья, где дробильно-измельчительные отделения поглощают до 60 % всех видов затрат. Необходимость вовлечения в переработку промышленных отходов, значительная часть которых содержит больше

полезных компонентов, чем природное сырье, обусловила создание новых технологий и машин для экономичных и эффективных процессов дробления и измельчения. Машины старой конструкции, такие как щековая эксцентриковая дробилка (изобретена в 1858 г.) и конусная эксцентриковая дробилка (изобретена в 1878 г.), а также барабанные шаровые и стержневые мельницы (изобретены в конце XIX века), в настоящее время вытесняются новыми более экономичными конструкциями при сохранении прежнего кинематического привода.

Схема применяемости в промышленности различного дробильно-измельчительного оборудования представлена на рис. 6.

Щековые дробилки с простым качанием подвижной щеки (рис. 7) могут принимать куски до 2 м, имеют степень дробления до 4 и способны обеспечивать первичное дробление металлургических шлаков, содержащих крупные корольки металла. Кроме того, они могут применяться для дробления железобетонных плит или вскрышных пород месторождений полезных ископаемых.

Щековые дробилки со сложным качанием подвижной щеки (рис. 8) используются более широко на разных стадиях дробления со степенью дробления до 5 и кроме упомянутых выше направлений применяются для дробления огнеупоров, абразивных кругов, отработанных железобетонных шпал и столбов.

Если в первых дробилках подвешенная щека качается как маятник, подвижный относительно своей оси, то во вторых дробилках ось подвижной щеки выполнена одновременно в качестве эксцентрикового вала, заставляющего щеку в момент дробления продвигаться вниз в сторону разгрузки, совершая эллиптическое движение.

Наличие в таких дробилках эффекта проталкивания раздробленной массы позволяет почти на 50 % увеличить производительность в сравнении с первой машиной. Однако износ броней щек возрастает пропорционально росту производительности.

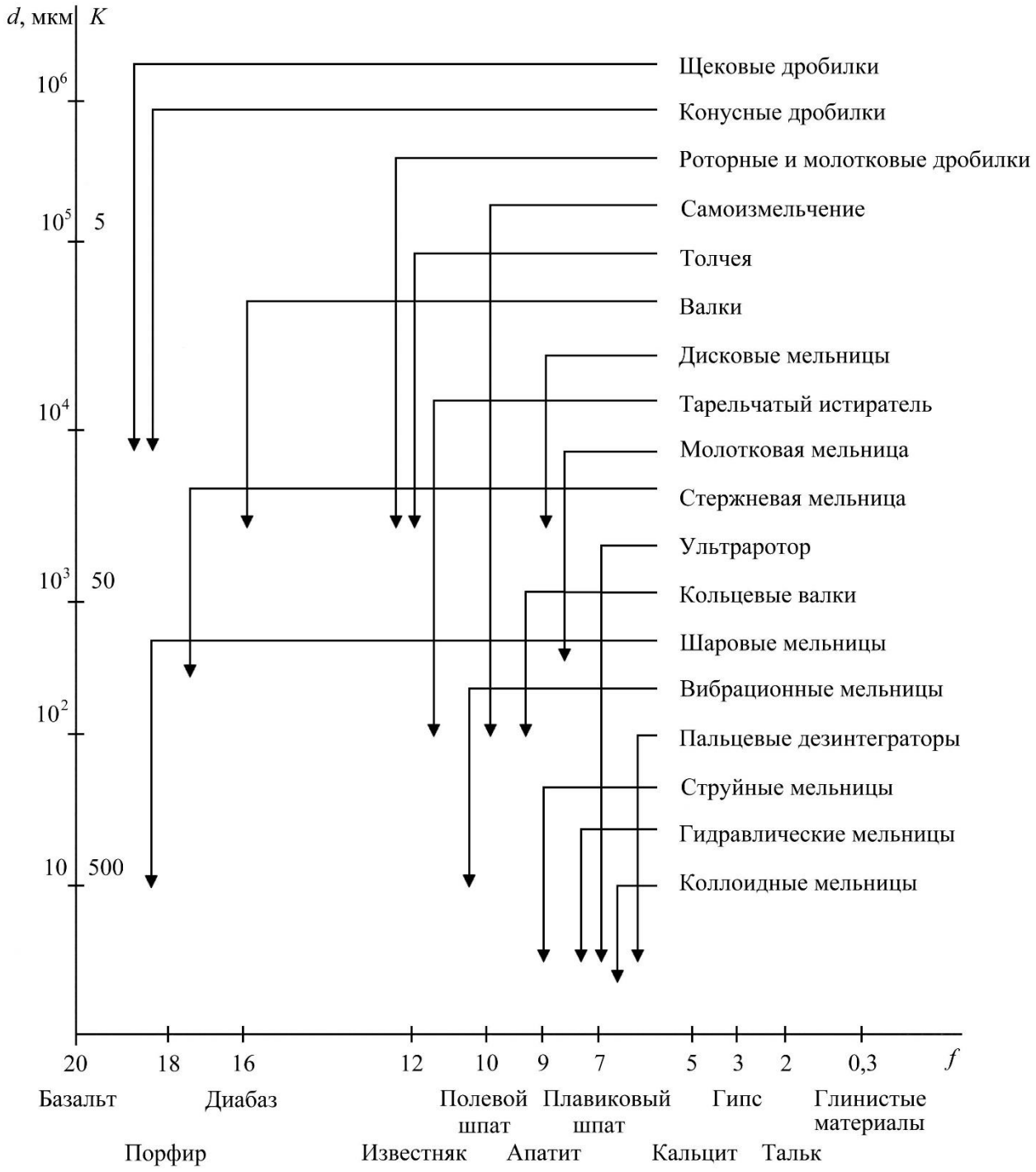


Рис. 6. Сравнительные характеристики дробильно-измельчительных машин по предельной прочности *f* разрушаемых в них минеральных отходов, диапазону крупности *d* исходного и конечного продуктов, степени сокращения *K*.

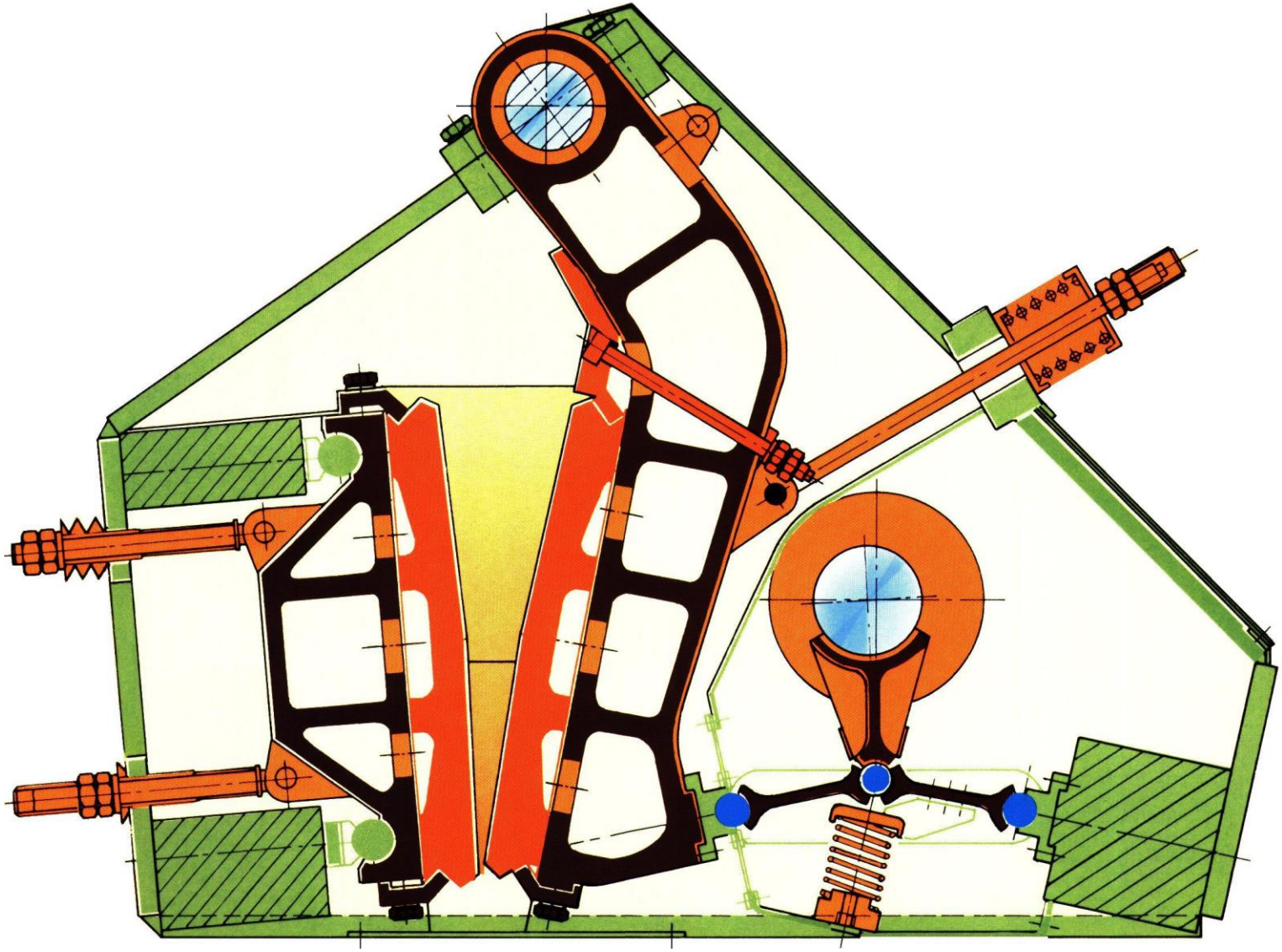


Рис. 7. Щековая дробилка с простым качанием подвижной щеки.

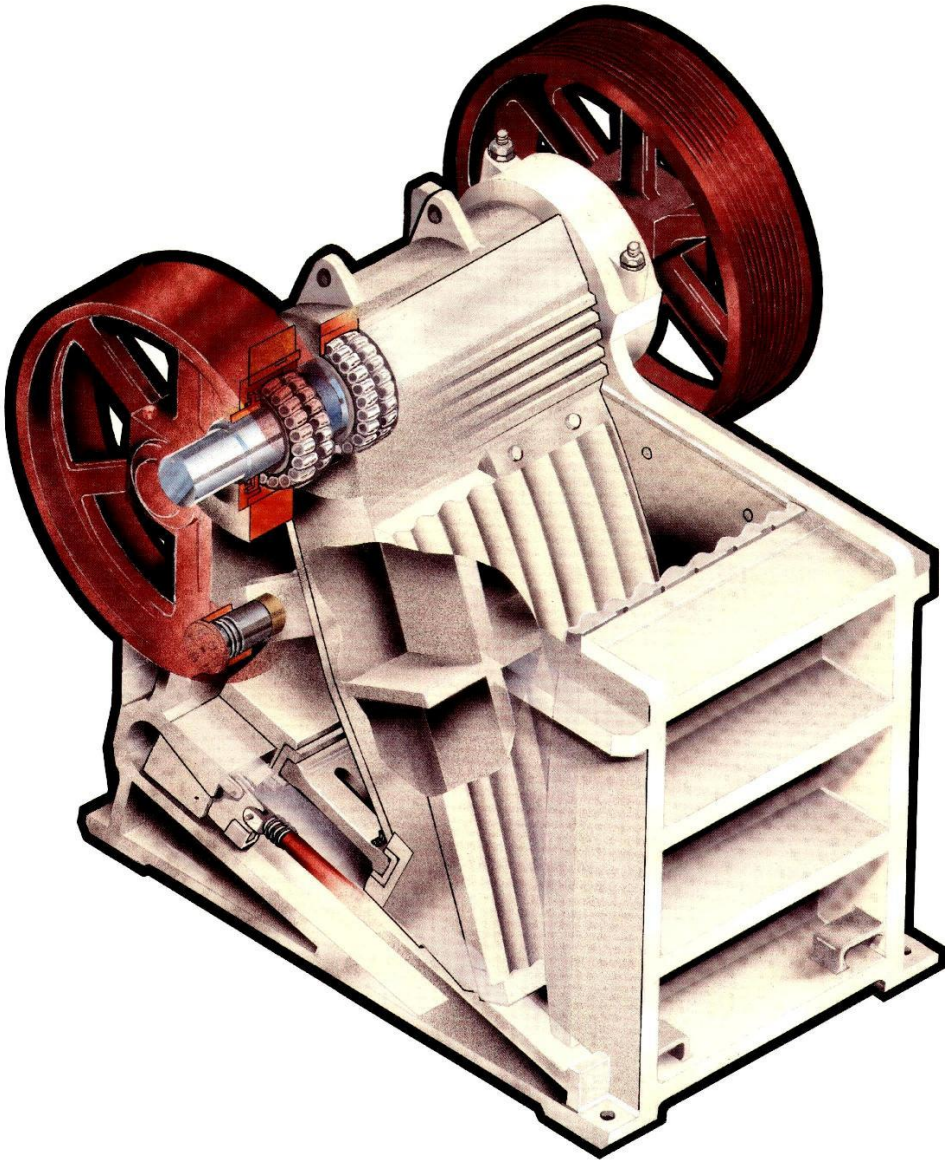


Рис. 8. Щековая дробилка со сложным качанием щеки.

В отличие от эксцентриковых щековых дробилок вибрационные щековые имеют на дробящих щеках вибраторы, которые вращаются противофазно без кинематической связи между собой за счет явления самосинхронизации [3].

Конструктивная схема такой машины показана на рис. 9. Как видно из схемы, такие дробилки имеют две подвижные щеки, а сила и частота вращения вибраторов регулируются, что позволяет настраивать машину на требуемый технологический режим в пределах степени дробления от 4 до 20 [11].

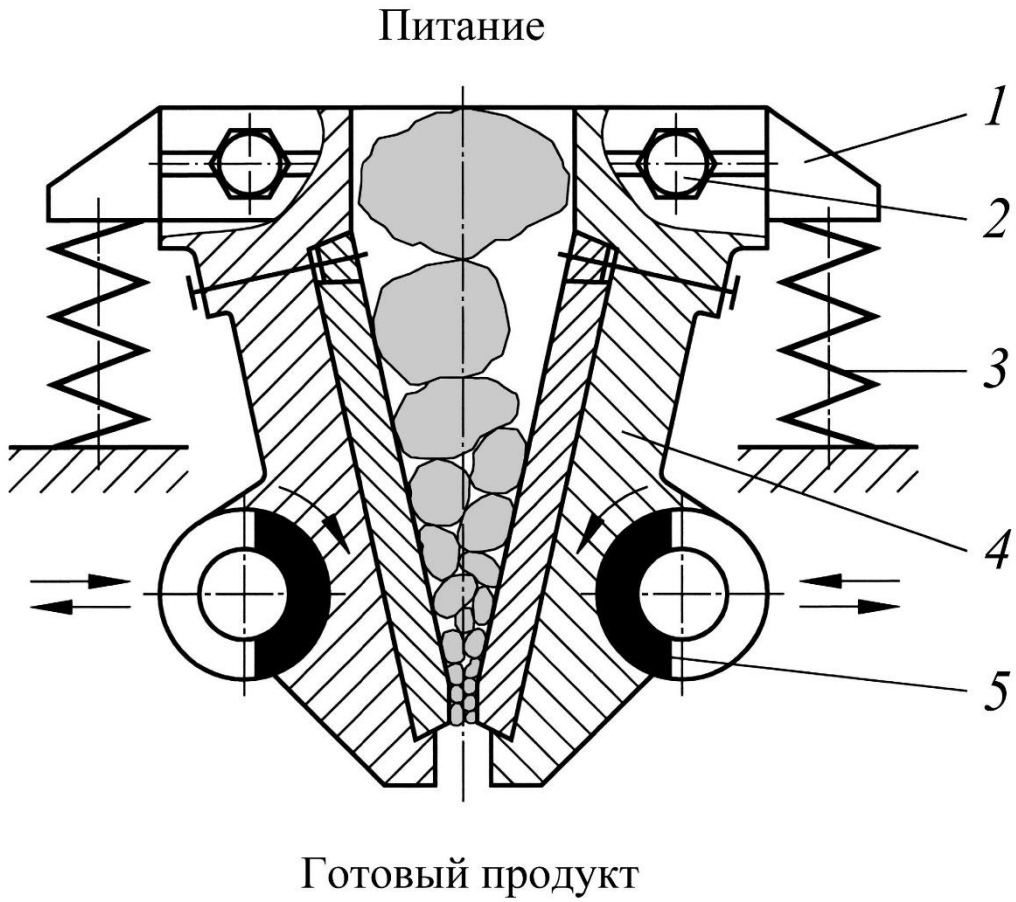


Рис. 9. Конструктивная схема виброщековой дробилки:
1 – корпус, 2 – торсион, 3 – амортизатор, 4 – подвижная щека, 5 - приводной дебалансный вибратор (стрелками показаны направления вращения вибровозбудителей и качаний щек).

Виброщековые дробилки способны перерабатывать отходы любой прочности, в том числе отработанные железобетонные изделия (рис. 10) [2].

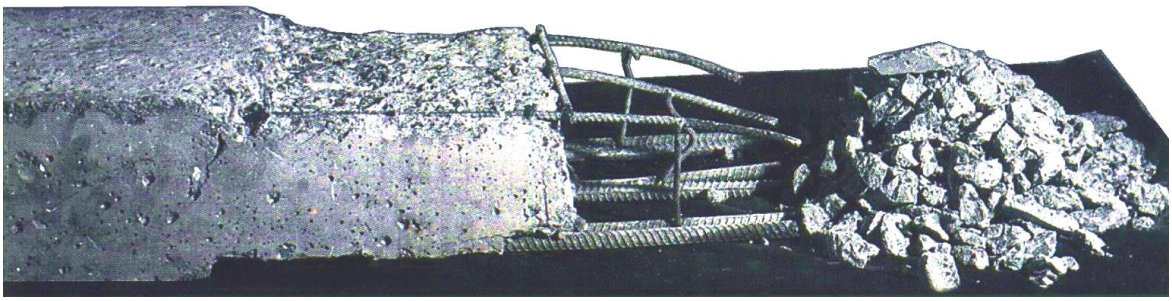


Рис. 10. Железобетонная свая, наполовину раздробленная в виброщековой дробилке.

Масса и энергопотребление таких дробилок ниже, чем эксцентриковых.

Если в щековых дробилках рабочий ход щеки чередуется с холостым ходом, то в конусных дробилках процесс дробления осуществляется непрерывно. Как и в щековых дробилках в традиционных конусных дробилках приводным элементом подвижного дробящего тела (внутреннего конуса) является эксцентрик, обеспечивающий ему круговое маятниковое качание при жесткой кинематической связи с корпусом наружного конуса.

Из всех существующих дробилок именно конусные наиболее широко используются в различных отраслях промышленности [2, 4, 7] и, в частности, для дробления твердых отходов. Поэтому на их особенностях следует остановиться подробнее.

Эксцентриковые конусные дробилки по сравнению с любыми другими дробильно-измельчительными аппаратами занимают меньшие площади, проще в эксплуатации, имеют пониженный расход электроэнергии и высокий коэффициент движения (до 90%). Именно по этим причинам такие машины нашли наибольшее распространение в промышленности.

На рис. 11 показана конструктивная схема конусной эксцентриковой дробилки, содержащей корпус *1* с наружным конусом *2*, внутри которого на сферической опоре *3* размещен подвижный конус *4* с валом *5*, установленным в приводном эксцентрике *6*, размещенным в цилиндрической расточке корпуса *1*. Эксцентрик *6* через зубчатую пару *7* соединен с электродвигателем.

При вращении эксцентрика *6* ось подвижного конуса *4* описывает коническую поверхность с вершиной в центре сферической опоры *3*. При этом конус *4*, приближаясь к наружному конусу *2*, разрушает материал, загружаемый в пространство между конусами. При расхождении конусов раздробленный материал разгружается через гарантированную щель между конусами у их основания.

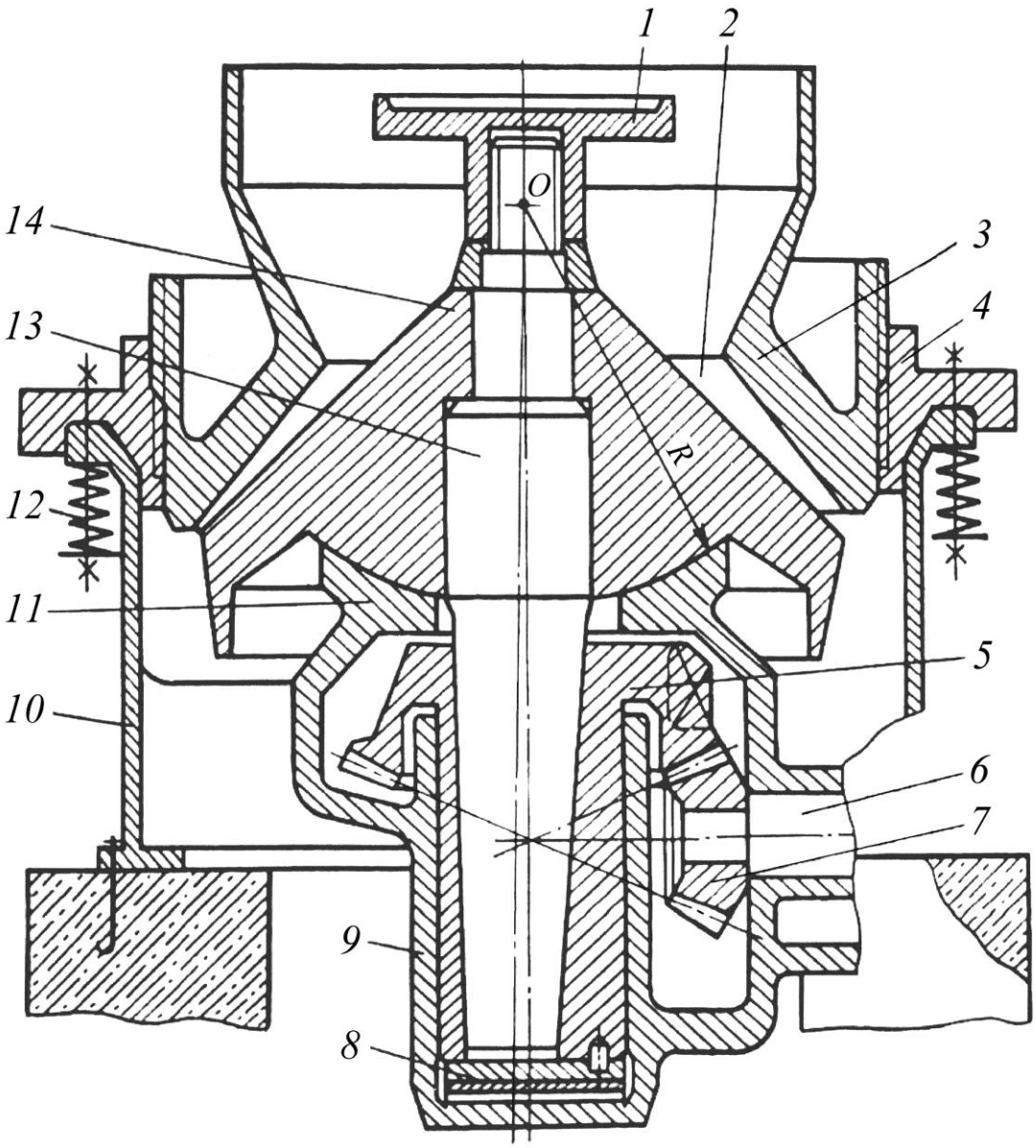


Рис. 11. Схема конусной эксцентриковой дробилки.

Конусные эксцентриковые дробилки имеют степень дробления при работе в открытом цикле не более 4-6. Эти машины выгодно отличаются от дробилок других типов главным образом способностью перерабатывать материал достаточно высокой прочности и абразивности при незначительных изменениях технологических показателей. За последние 10 лет бывший «Уралмаш», финский концерн Metso, американский Telsmith, шведский Sandvic, японский Kobelco создали конусные эксцентриковые дробилки повышенной производительности и надежности, снабженные современными

системами автоматизации, однако, их степень дробления осталась прежней, и планы технологов сократить эксплуатационные расходы в мельничных отделениях осуществились не более чем на 7-8 %.

Низкая степень дробления эксцентриковых дробилок объясняется использованием в качестве приводного элемента подвижного конуса эксцентрика, который ограничивает амплитуду конуса конструктивно заданным смещением своей оси относительно оси вращения. Поэтому слой материала даже низкой крепости не может быть деформирован на величину больше установленного зазора между конусами, что заранее предопределяет низкую степень дробления. В дробилках с диаметром подвижного конуса 2200 мм толщина слоя материала в разгрузочной зоне не может быть менее 10 мм, что объясняется следующим. Брони неподвижного и подвижного конусов неизбежно имеют некоторую эллиптичность и неконцентричность, которые после механической обработки не должны превышать соответственно 0,05 % и 0,1 % диаметра броней у основания. При совпадении знаков допусков суммарная разница диаметров броней составляет 6,4 мм. Если рабочий зазор между конусами установить меньше этого значения, то при работе дробилки на холостом ходу могут возникать соударения броней. Поскольку такое совпадение знаков допусков маловероятно, на практике допускается установка зазора не менее 5 мм.

Рабочий зазор измеряют и регулируют на холостом ходу дробилки, когда подвижный конус под действием своей центробежной силы смещается к неподвижному конусу и прижимается хвостовиком своего вала к тонкой стороне эксцентрика. Однако при работе дробилки под нагрузкой хвостовик вала, под действием сопротивления слоя дробимого материала прижимается к толстой стороне эксцентрика. Поскольку в дробилке КМД-2200Т, имеющей новые детали, суммарные зазоры в приводной втулке составляют 4 мм, а на холостом ходу измеренный рабочий зазор составляет 5 мм, то при работе под нагрузкой толщина слоя материала в рабочей зоне будет 9 мм. С увеличением износа вала и эксцентрика толщина упомянутого слоя возрастает, что

приводит к неизбежному закрупнению дробленого продукта, коэффициент которого по отношению к установленному на холостом ходу рабочему зазору принимается равным 3,5.

Другая существенная причина низкой степени дробления эксцентриковых дробилок – ограниченная частота качаний подвижного конуса. С увеличением частоты воздействия конуса на дробимый материал снижается крупность продукта и коэффициент закрупнения, однако при этом пропорционально квадрату частоты качаний возрастает центробежная сила подвижного конуса, а, следовательно, и степень неуравновешенности дробилки. При этом на холостом ходу эксцентрик и подвижный конус на своем подпятнике работают крайне ненадежно. Если применяемые в настоящее время упругие амортизаторы защищают фундамент дробилки от разрушения, то опасность заклинки вала подвижного конуса в эксцентрике на холостом ходу на повышенной частоте качаний сохраняется.

Не менее важной причиной ограничения технологических параметров эксцентриковых дробилок является их высокая чувствительность к неравномерности загрузки исходным материалом, как по массе, так и по гранулометрическому составу.

Важно также обеспечить условия для равномерного распределения исходного материала по окружности дробящей полости.

Распределительная тарель, установленная на вершине подвижного конуса, не обеспечивает требуемой равномерности распределения исходного материала из-за невозможности в большинстве случаев подачи потока материала в ее центр или из-за образования на поверхности тарели наростов мелочи. В таких условиях дробилка работает неравномерно с пиковыми напряжениями в деталях и узлах привода, а износ броней носит волнообразный характер, в местные выработки которых проваливаются крупные куски дробимого материала. Для компенсации этого явления на ряде предприятий осуществляют механическую обработку броней (один-два раза за срок их службы), удорожающую эксплуатацию дробилок, но

обеспечивающую рентабельность этих мер благодаря повышению производительности мельниц.

Следующим ограничительным фактором интенсификации работы эксцентриковых дробилок является опасность повреждения их механизма в связи с переполнением дробящей полости перерабатываемым материалом высокой крепости.

В количественном отношении поток материала на большинстве предприятий регулируется дробильщиком вручную и выбирается таким образом, чтобы над входом в дробящую полость не скапливался слой материала. Дальнейшее повышение подачи питания при переработке крепких твердых отходов и неизбежной неравномерности загрузки им дробилки приводит к срабатыванию пружин опорного кольца, повышению нагрузок на привод и запрессовке дробилки. Для устранения этих явлений дробильщик стремится подавать заведомо пониженное количество материала в дробилку, что в свою очередь приводит к другим нежелательным явлениям.

При существующей частоте качаний подвижного конуса (242 мин$^{-1}$) кусок руды зажимается в дробящей полости при условии полного ее заполнения около 7 раз, однако, чем ниже производительность, тем с большей скоростью кусок проходит дробящую полость, подвергаясь в ней иногда двум-трем обжатиям. Такой режим приводит не только к уменьшению степени дробления, но и к резкому снижению ресурса дробилки из-за вибраций вала конуса в эксцентрике при одновременном пробое слоя масла на поверхности трения и выходе на полусухое трение.

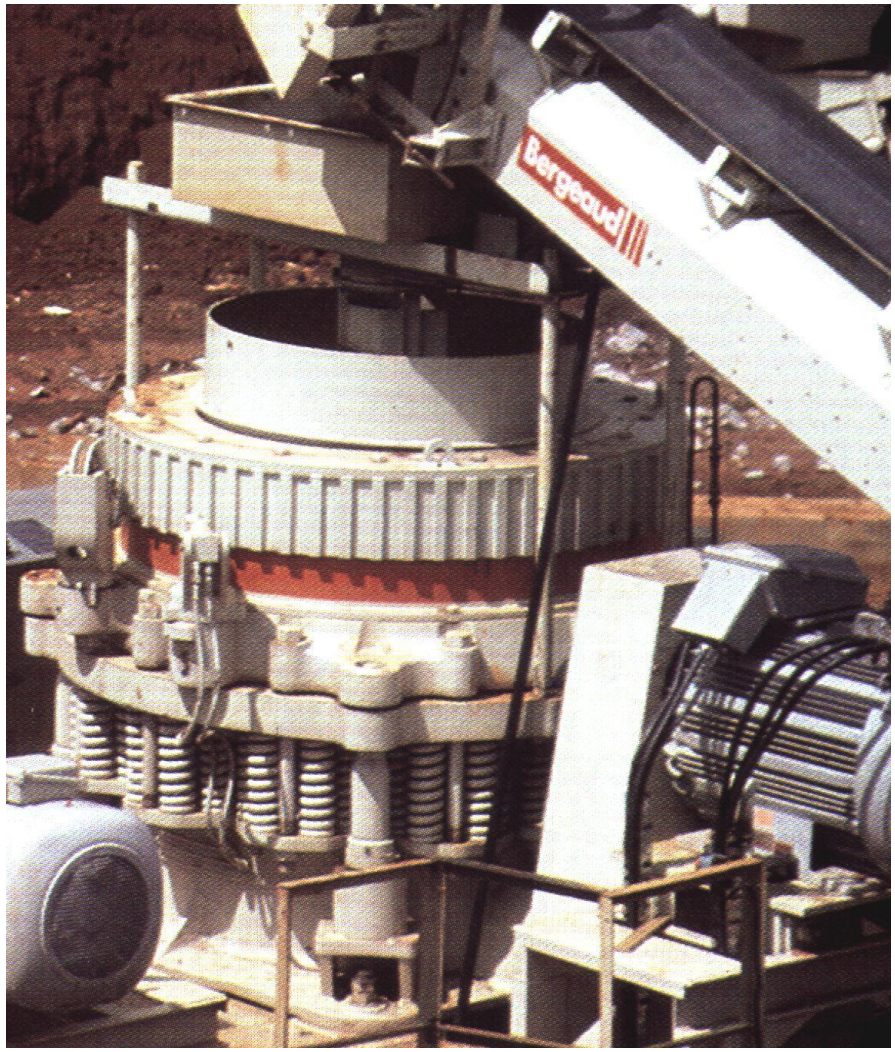
Таким образом, к основным факторам, ограничивающим технологические параметры конусных эксцентриковых дробилок, следует отнести:

- эллиптичность и неконцентричность броней конусов;
- повышенные радиальные зазоры в приводном эксцентриковом механизме;

- чувствительность к неравномерности загрузки исходным материалом;
- ограниченную частоту качаний подвижного конуса;
- отсутствие отработанных способов и средств количественной оптимизации питания.

В настоящее время доминируют в основном три различные исполнения конусных эксцентриковых дробилок. Дробилка типа «Саймонс», впервые появившаяся в середине 20-х годов прошлого века (рис. 12), дробилка «Гидрокон» (рис. 13), впервые созданная в 30-х годах, и дробилка «Telsmith» (рис. 14), принятая в эксплуатацию в 80-х годах.

Упомянутые дробилки имеют степень дробления соответственно 4,5 и 6 отличаются по уровню надежности, рыночной стоимости и эксплуатационным затратам. Наиболее широко распространены дробилки «Гидрокон», наиболее удобные в эксплуатации, особенно при регулировке разгрузочной щели и пропуске недробимых тел. Однако они остаются и наиболее дорогими. Несмотря на полную автоматизацию этих дробилок, все недостатки, присущие первичной идее, сохранились.



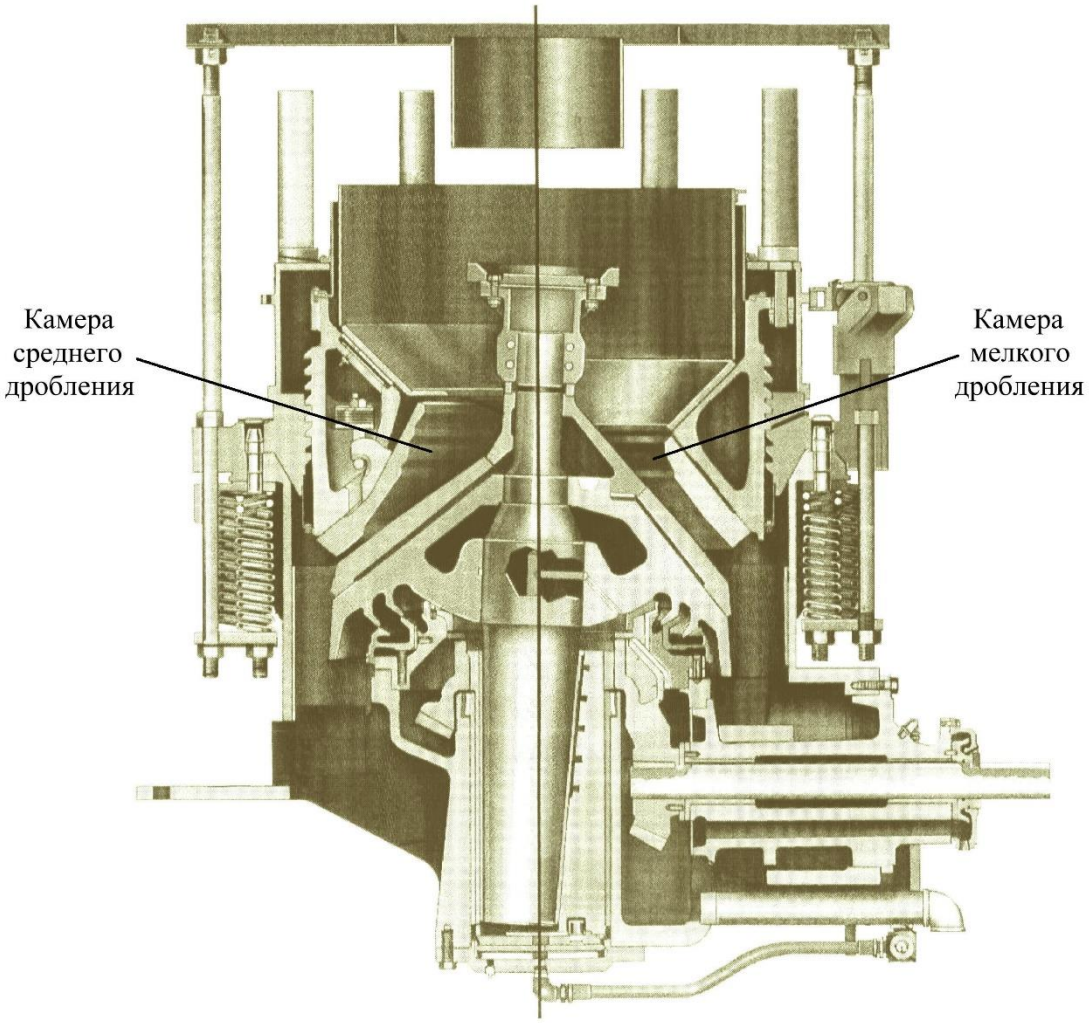


Рис. 12. Конусная эксцентриковая дробилка «Саймонс».

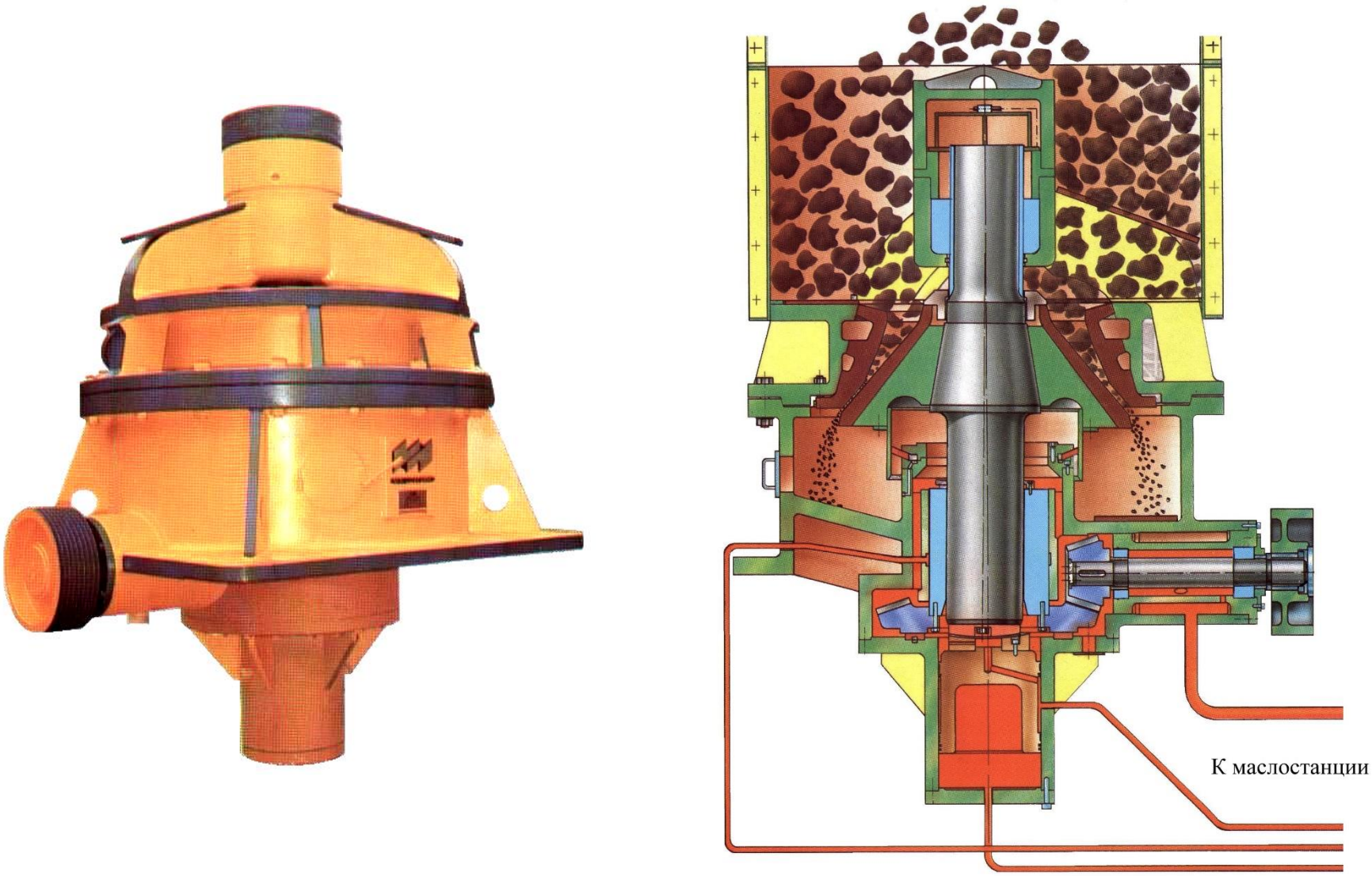


Рис. 13. Конусная эксцентриковая дробилка «Гидрокон».

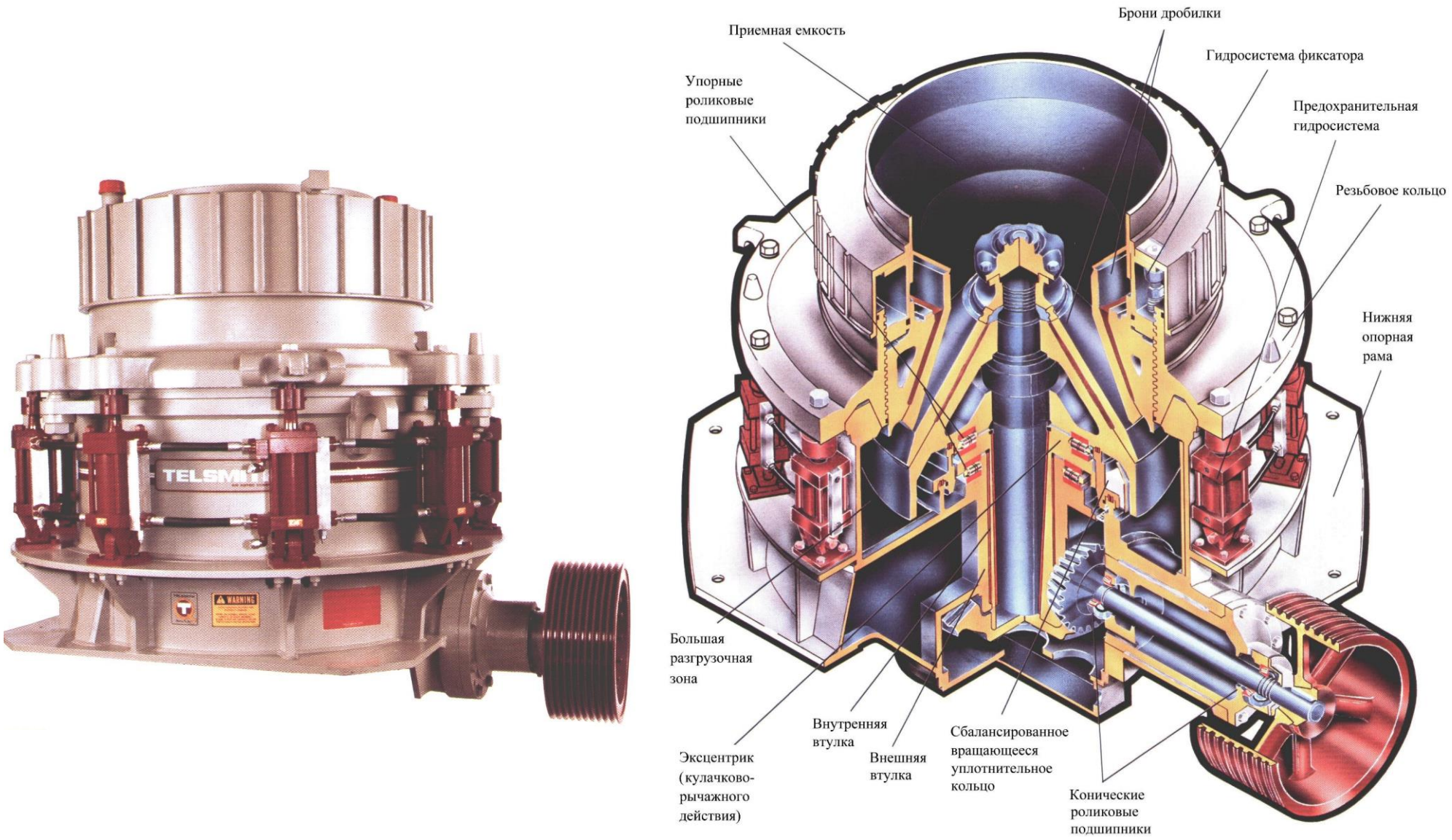


Рис. 14. Конусная эксцентриковая дробилка фирмы Telsmith.

Дальнейшее улучшение технологических показателей эксцентриковых дробилок в силу жесткости кинематических связей между их дробящими телами практически невозможно, тем более, невозможно добиваться селективности раскрытия материалов или перерабатывать материалы с прочностью выше 20 по шкале М. М. Протодьяконова. Поэтому возможности радикальной интенсификации процесса дезинтеграции в таких машинах оказались практически исчерпанными. Поставленную задачу удалось реализовать в процессе создания конусной инерционной дробилки (КИД).

Схема инерционной дробилки практически является дальнейшим развитием схемы эксцентриковой дробилки типа «Саймонс». Основное отличие заключается в том, что эксцентрик заменен приводным вибратором дебалансного типа. Его применение и обусловливает ряд принципиальных особенностей КИД по сравнению с дробилками, имеющими эксцентриковый привод.

Принципиальная конструктивная схема промышленной КИД показана на рис. 15 [7].

Дробилка содержит наружный *1* и внутренний *2* дробящие конуса. Оба конуса защищены бронями, обращенные друг к другу поверхности которых образуют камеру дробления. На валу *3* внутреннего подвижного конуса с помощью подшипника смонтирован дебалансный вибратор *4*, приводимый во вращение через трансмиссию *5*. При вращении дебалансного вибратора создается центробежная сила, заставляющая внутренний конус обкатываться по наружному без зазора, если в камере дробления нет перерабатываемого материала или через слой этого материала. Такие различные виды перемещений внутреннего конуса становятся возможными благодаря отсутствию в этих машинах кинематического ограничения амплитуды внутреннего конуса.

Следует отметить, что идея использования вибратора в качестве привода конусной дробилки появилась еще в 1925 г. (патент США №1553333), затем ее варианты были опубликованы в более поздних зарубежных патентах (ФРГ

– №879800, 1952 г.; Австрия – №200598, 1957 г.; Япония – №1256, 1972 г.). Однако до 1981 г., когда в Японии была освоена по советской лицензии первая зарубежная инерционная дробилка, сведений о выпуске иностранными фирмами подобных машин нет.

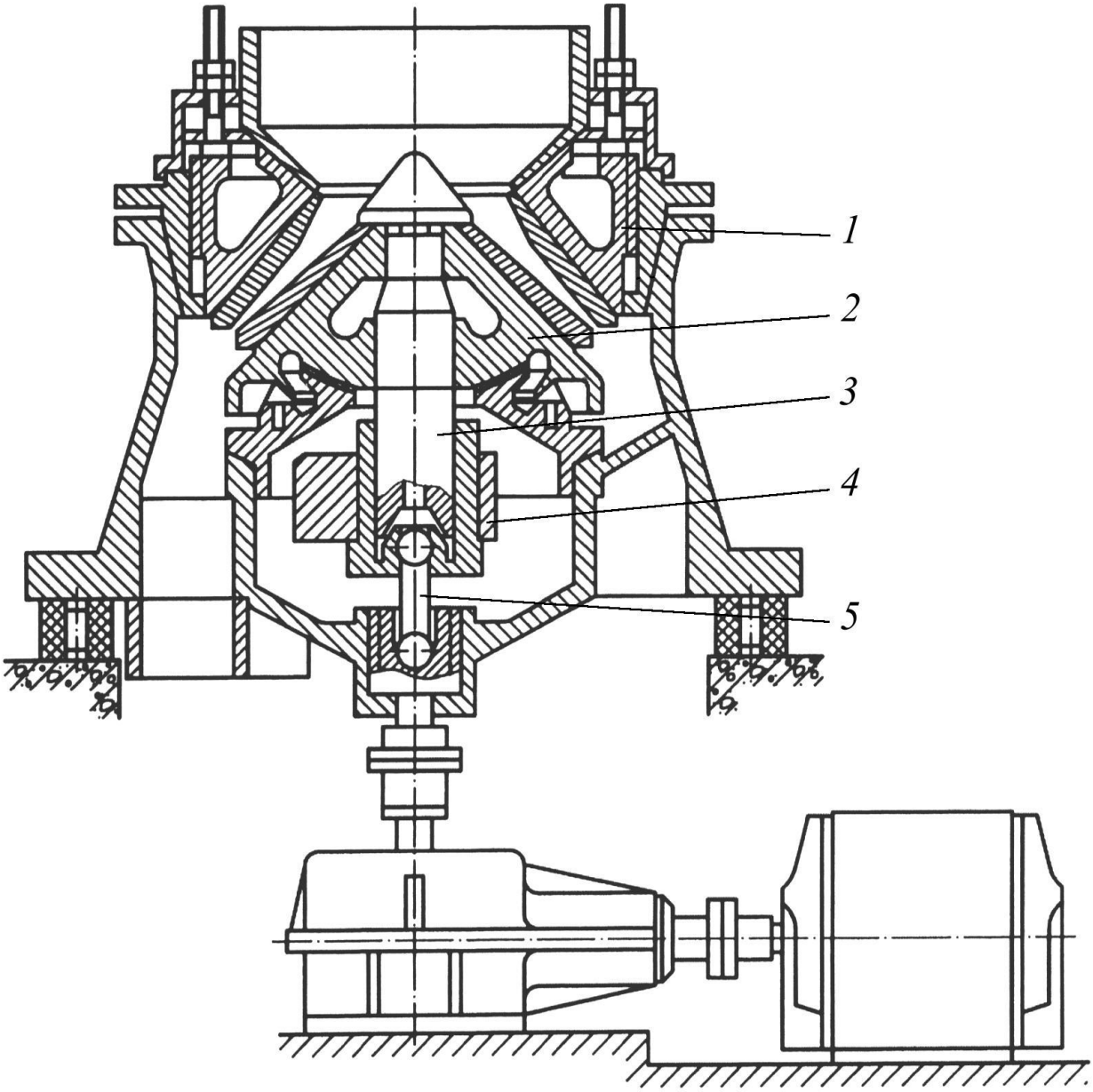


Рис. 15. Конструктивная схема конусной инерционной дробилки.

Во Всесоюзном научно-исследовательском и проектном институте механической обработки полезных ископаемых (далее по тексту – институт) работы над первыми экспериментальными образцами КИД были начаты под руководством К. А. Рундквиста в 1948 г. К настоящему времени созданы и

внедрены в различных отраслях промышленности дробилки производительностью от 1 до 350 т/ч. В создании наиболее крупных дробилок (КИД-1750 и КИД-2200), предназначенных для горно-обогатительной промышленности, самое непосредственное участие принимало ПО «Уралмаш».

Применение дебалансного вибратора определяет некоторые особенности КИД по сравнению с эксцентриковыми дробилками. Основная особенность – отсутствие в КИД жестких кинематических связей между конусами, что позволяет внутреннему конусу обкатываться по наружному на холостом ходу без зазора даже по эллиптической орбите (образовавшейся, например, в процессе эксплуатации дробилки).

В рабочем режиме внутренний подвижной конус может менять свою амплитуду в зависимости от неравномерности сопротивления дробимого материала по окружности дробящей полости, или его движение в смещенном от оси дробилки положении может быть остановлено крупным недробимым телом, что не приносит ущерба механизму дробилки и не приводит к стопорению дебаланса. Таким образом, КИД не имеет разгрузочного зазора в понимании, принятом для эксцентриковых дробилок, поэтому под этим термином в КИД принимается размер диаметрального кольцевого зазора между конусами при совмещении их осей.

Вторая особенность КИД по сравнению с обычными дробилками – различие в характере дробящей силы. В эксцентриковой дробилке дробящая сила зависит от крепости перерабатываемого материала и степени заполнения им дробящей полости, а на холостом ходу она равна нулю. В КИД дробящей силой является сумма центробежной силы дебаланса и внутреннего конуса при его гирационном движении. Такая сила определяется механикой и не зависит от свойств перерабатываемого материала. Дробящая сила сохраняется и на холостом ходу за счет беззазорной обкатки конусов. Таким образом, в КИД нет общепринятого понятия холостого хода. В этой связи в них нет

необходимости принимать меры для обеспечения устойчивости внутреннего конуса на сферической опоре на холостом ходу.

Это обстоятельство в сочетании с упругой изоляцией КИД от фундамента позволило в 2 раза увеличить частоту качаний внутреннего конуса. Кроме того, отказ от работы КИД в условиях дозированного питания и перевод их на питание «под завалом» рудой позволил свести к минимуму влияние сегрегации руды на технологические показатели.

Французская фирма FCB, воспользовавшись российским патентом, действие которого по времени закончилось, создали инерционную дробилку с 2 или 4 вибраторами на корпусе, соединенными цепной передачей для принудительной синхронизации (рис. 16).

Ось внутреннего конуса этой дробилки перемещается параллельно оси наружного конуса (без углового отклонения), поэтому гранулометрический состав продукта очень растянут (много крупных и много очень мелких частиц). Преимущество этой машины авторы видят в простоте конструкции и ремонтной доступности всех основных узлов. Максимальный размер дробящего конуса дробилки 1000 мм.

Технические характеристики и эксплуатационные показатели конусных эксцентриковых и вибрационных дробилок мелкого дробления для сравнения приведены в таблице 1.

Таким образом, рассмотренные в предыдущих разделах факторы, ограничивающие технологические показатели эксцентриковых дробилок, полностью устранены в инерционных дробилках. Это создало предпосылки для резкого увеличения технологических показателей конусных дробилок и выявления ряда их новых полезных эксплуатационных свойств, в частности для переработки твердых отходов.

Длительная промышленная эксплуатация инерционных дробилок позволила создать дробилку с более простой схемой, которая показана на рис.17.

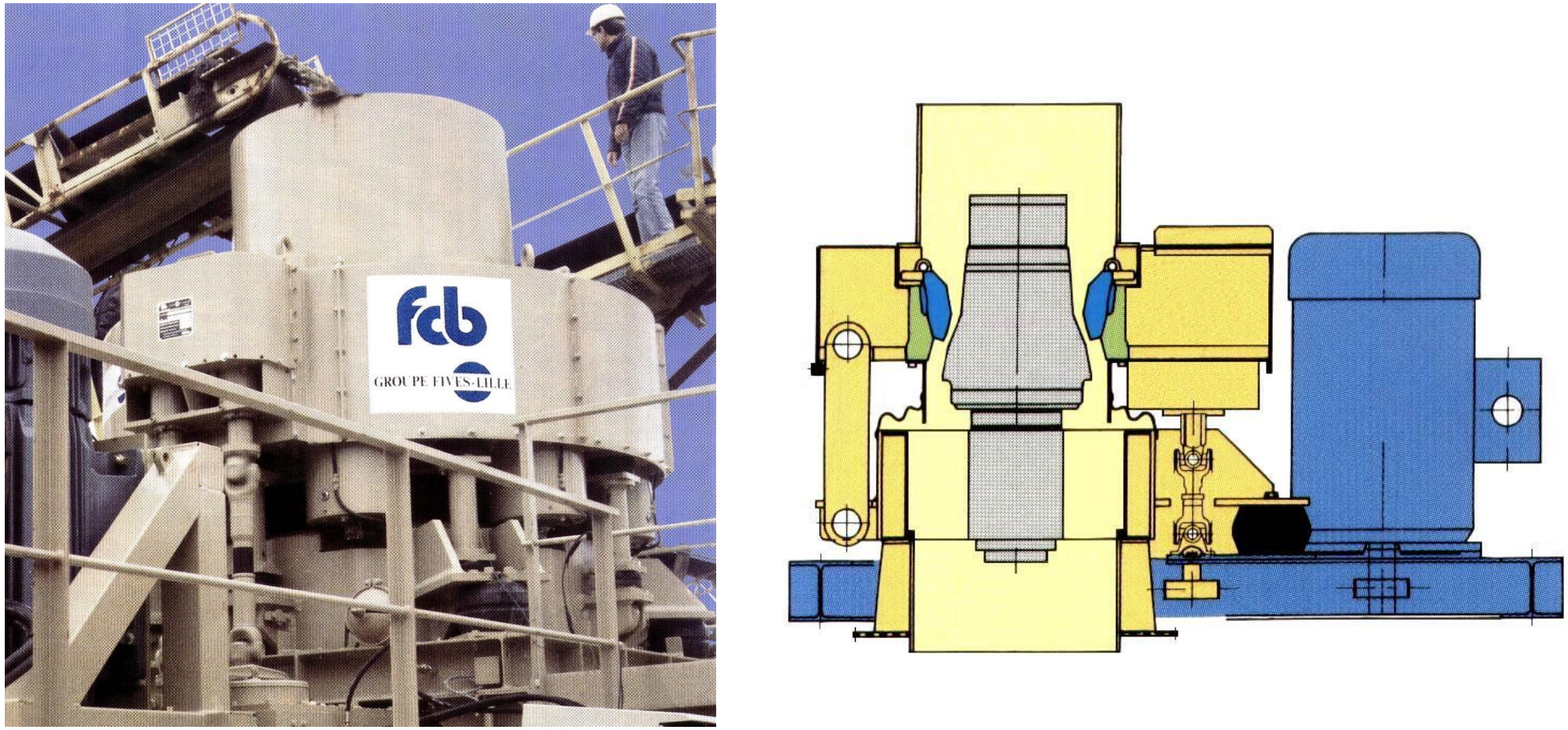


Рис. 16. Вибрационная конусная дробилка французской фирмы FCB.

Таблица 1

Сравнительная таблица характеристик конусных эксцентриковых и вибрационных дробилок мелкого дробления

Показатели	Эксцентриковая конусная дробилка 1200	КИД-1200	Эксцентриковая конусная дробилка 2200	КИД-2200
Диаметр конуса у основания, мм	1200	1200	2200	2200
Производительность по питанию на минералах с прочностью кварца в открытом цикле, т/ч: - при производстве песка или сверхтонком дроблении руд; - при мелком дроблении до 20 мм	невозможно 200	160 (95% мельче 6 мм) 250	невозможно 350	350 (95% мельче 10 мм) 500
Максимальный размер куска в питании, мм	70	170	90	300
Степень дробления	4-6	6-30 (регулируемая на ходу частотой тока)	4-6	6-30 (регулируемая на ходу частотой тока)
Отсев по классу 5-0 мм при производстве щебня, из отходов железобетона %	35	25	32	22
Крупность 95% продукта при сверхтонком дроблении в открытом цикле, мм (гранулометрическая характеристика)		6-0 (близка к характеристике стержневой мельницы)		10-0 (близка к характеристике стержневой мельницы
Приводной электродвигатель (щебень/сверхтонкое дробление), кВт	200/0	160/200	320/0	300/450
Удельный расход электроэнергии при производстве щебня, кВтч/т	0,8	0,6	0,9	0,6
Срок службы броней конусов, ч	80	1400	1000	1700
Масса дробилки, т старого поколения нового поколения (КИД-проект)	18 18	28 19	90 90	150 100
Габариты нового поколения	-	Идентичны старому	-	Идентичны старому

Продолжение таблицы

Характеристики эксплуатации	Эксцентриковая конусная дробилка 1200	КИД-1200	Эксцентриковая конусная дробилка 2200	КИД-2200
Пуск и остановка	без нагрузки	под нагрузкой	без нагрузки	под нагрузкой
Потребность в предохранительном механизме	да	нет	да	нет
Потребность в питателе	да	нет	да	нет
Производительность при мокром дроблении в сравнении с сухим дроблением, т/ч	на 50% выше	на 100% выше	на 50% выше	на 100% выше
Уровень селективности раскрытия твердых отходов	низкий	высокий	низкий	высокий
Возможность получения продукта флотационной крупности при работе в замкнутом цикле	нет	да	нет	да
Возможность тонкого измельчения растительных отходов	нет	да	нет	да
Возможность измельчения металлов, в том числе твердых сплавов	нет	да	нет	да

Роторные и молотковые дробилки (рис. 18 и 19) способны принимать куски до 2 м, однако прочность перерабатываемого материала не должна быть выше 14 по шкале М. М. Протодьяконова (гранит, известняк). Однако молотковые дробилки специальных конструкций используются для первичного дробления металлургических шлаков, железобетонных плит, автомобильного, бытового и электронного лома. Ударные дробилки других модификаций используют для дробления отходов пластмасс, стекла, макулатуры и резины. Для каждого случая применяется своя конструкция мелющей камеры, отбойных плит, решетки и молотков (рис. 20).

Для дробления крупногабаритных нехрупких и часто пластичных отходов, например холодильников, автопокрышек и т. п., применяют ножевые одно или двухвальные дробилки (шреддеры), валы которых снабжены режущими дисками с захватывающими зубьями (рис. 21).

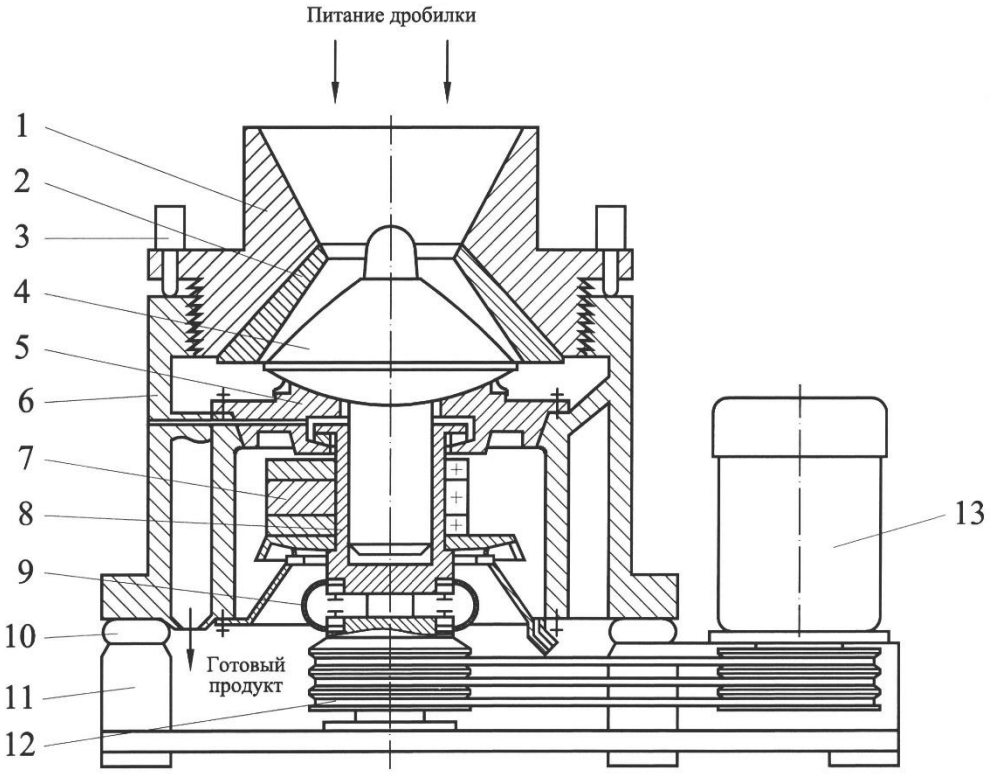


Рис. 17. Упрощенная конструктивная схема КИД:

1 – наружный конус, *2* – броня наружного конуса, *3* – гидродомкрат, *4* – внутренний конус, *5* – сферическая опора, *6* – корпус, *7* – неуравновешенный ротор-вибратор, *8* – подшипник ротора-вибратора, *9* – эластичная муфта, *10* – резиновые амортизаторы, *11* – металлическая опора, *12* – клиноременная передача, *13* – электродвигатель.

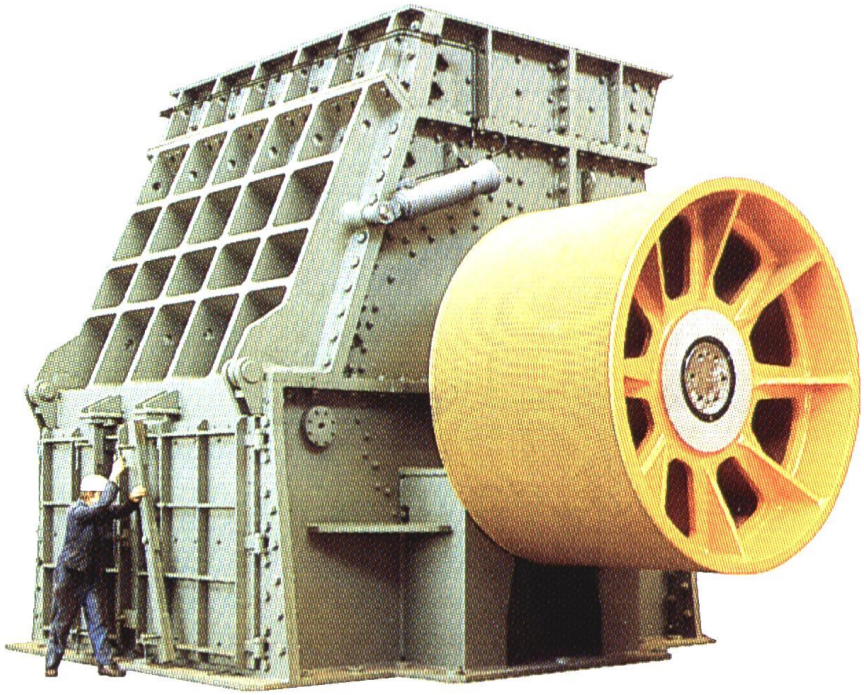


Рис. 18. Молотковая дробилка фирмы Krupp.

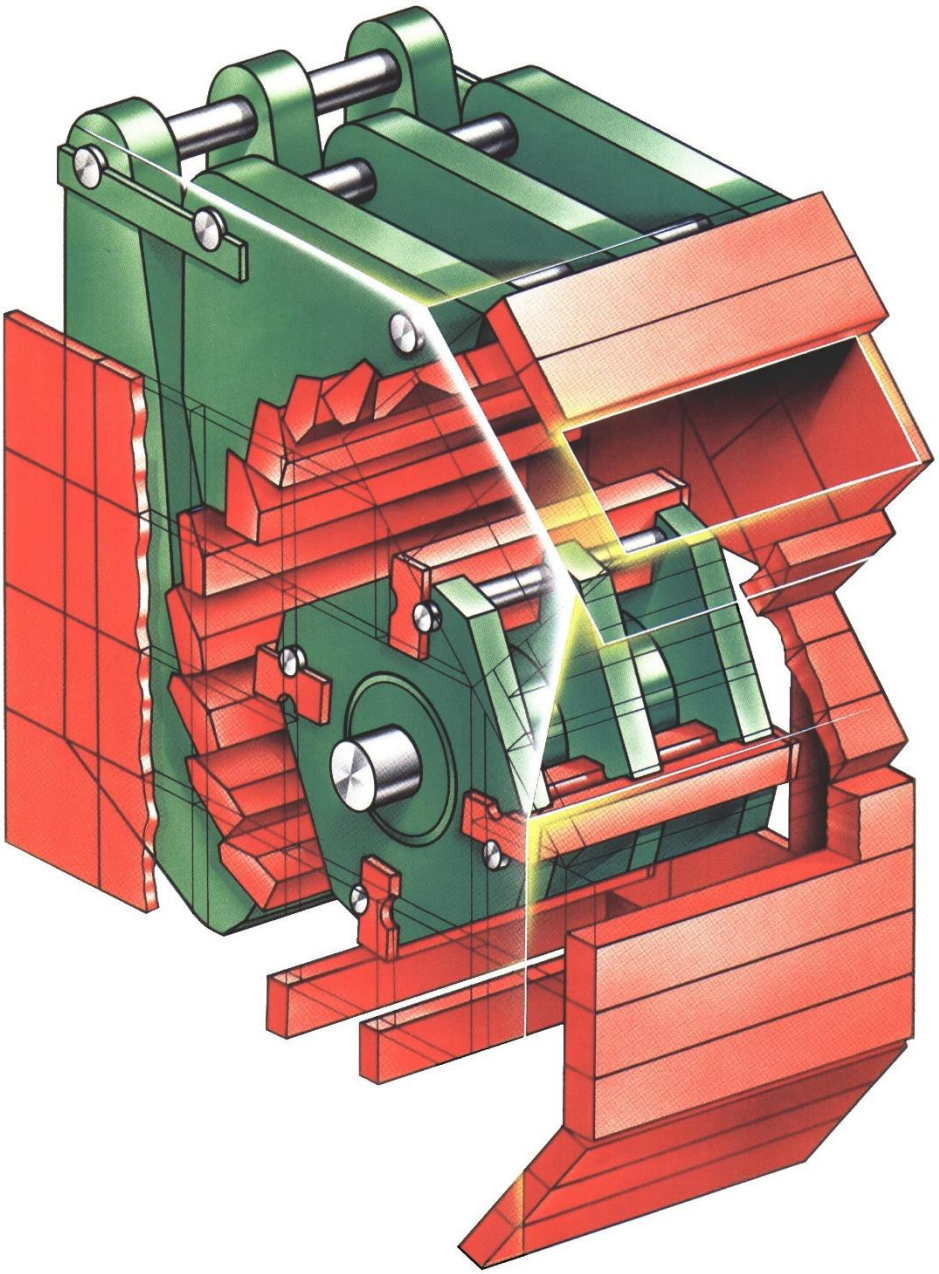


Рис. 19. Роторная дробилка фирмы Alpine.

Дно камеры таких дробилок снабжено калибрующими решетками, гарантирующими заданную крупность частиц. Ножевые дробилки чаще всего используются как головные машины первичного дробления. Такие дробилки требуют периодической зачистки кромок дисковых ножей в среднем один раз в 2-4 месяца.

Другие дробилки, такие как валковые, зубчатые или бегуны для дробления твердых промышленных отходов не применяются.

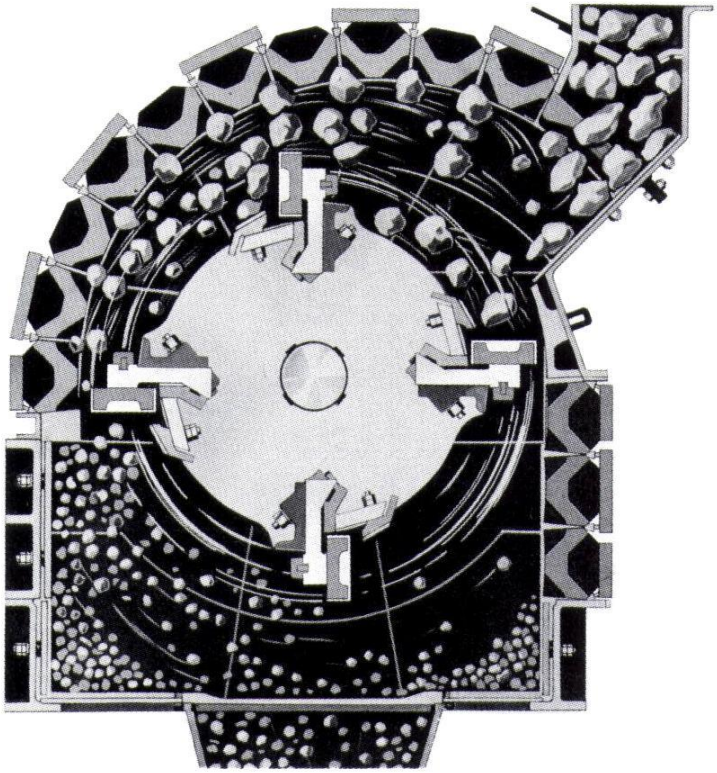


Рис. 20. Роторная дробилка.

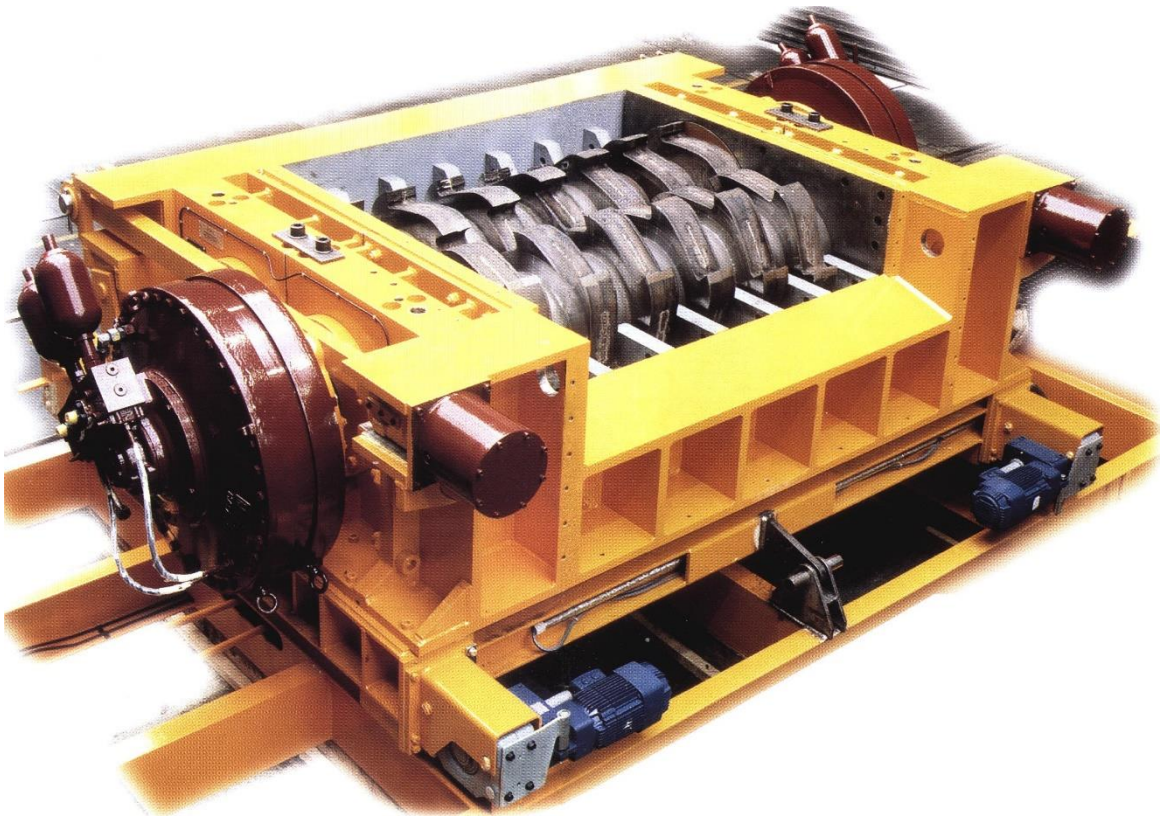


Рис. 21. Ножевая дробилка фирмы Metso.

1.3. Мельницы

Мельницами принято называть измельчительные машины, которые обеспечивают получение продукта мельче 5 мм. Например, барабанная мельница, в которой мелющими телами являются стальные стержни (рис. 22), принимает куски 25 мм и дает продукт мельче 5 мм, в котором содержится до 50 % частиц мельче 150 мкм. Однако существуют также мельницы сверхтонкого помола, в которых получают продукт мельче 5-10 мкм. Это струйные мельницы, аттриторы и бисерные мельницы. Однако питание этих машин осуществляется частицами мельче 0,5-1 мм, иначе при более крупном питании их эффективность резко падает.

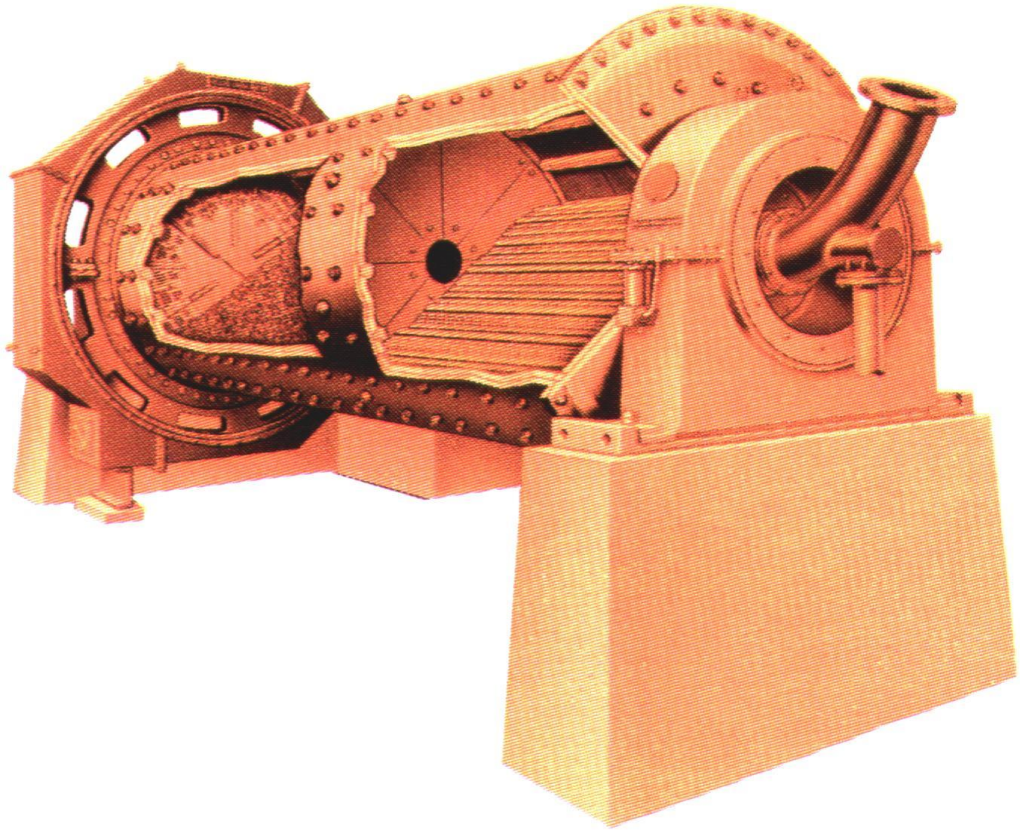


Рис. 22. Стержневая мельница.

Шаровая мельница (рис. 23) так же как и стержневая имеет вращающийся барабан, заполненный на 40 % объема шарами вместо

стержней. КПД барабанных мельниц не превышает 1 %, а износ мелющих тел в них достигает 3 кг на 1 тонну измельчаемого материала. Необходимость применения таких мельниц приводит к весьма высоким энергозатратам в дробильно-измельчительных переделах.

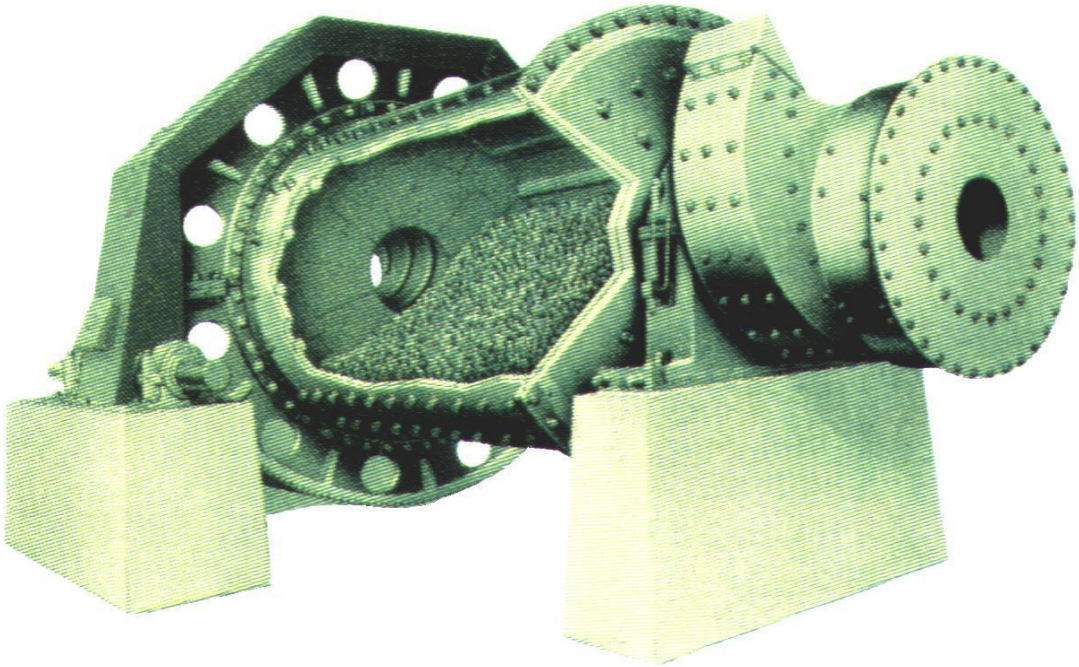


Рис. 23. Шаровая мельница.

Другой тип мельниц для материалов, не содержащих недробимых включений, содержит ротор с подвешенными к нему мелющими катками, каждый из которых снабжен гидравлическим или пружинным прижимом к неподвижному мелющему телу (рис. 24). Измельчаемый материал загружается на мелющую поверхность и, попадая под катки, измельчается. Регулируя скорость вращения ротора, усилие прижатия катков и уровень циркуляции при обязательной работе в замкнутом цикле, можно получать продукт, близкий по крупности частицам цемента.

Современные центробежные отражательные мельницы (рис. 25) используются для грубого измельчения твердых отходов не прочнее гранита. В отличие от ранее производимых мельниц подобной конструкции питание в них однопоточное, однако ротор и статор имеют более сложную форму.

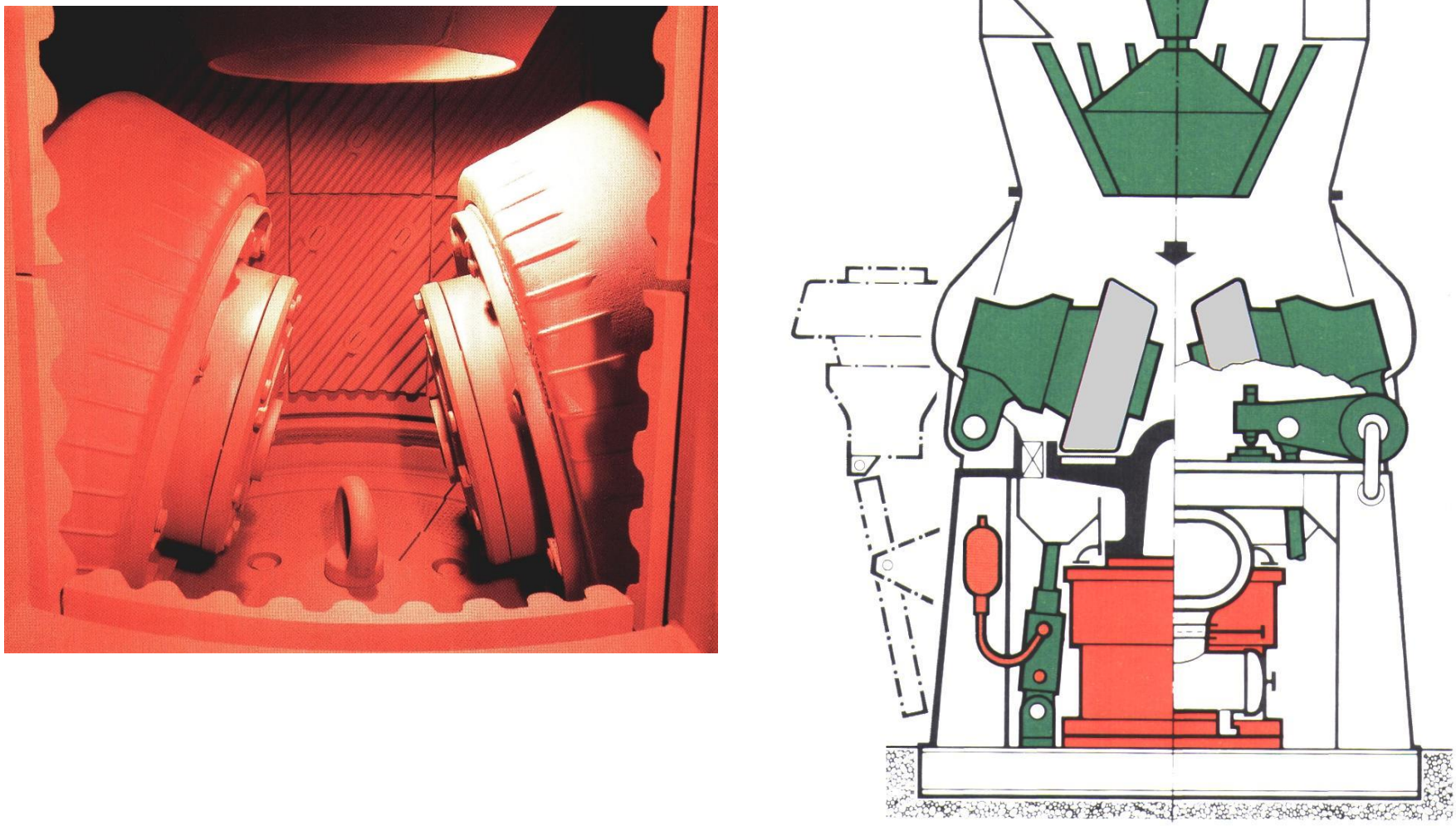


Рис. 24. Роликовая мельница.

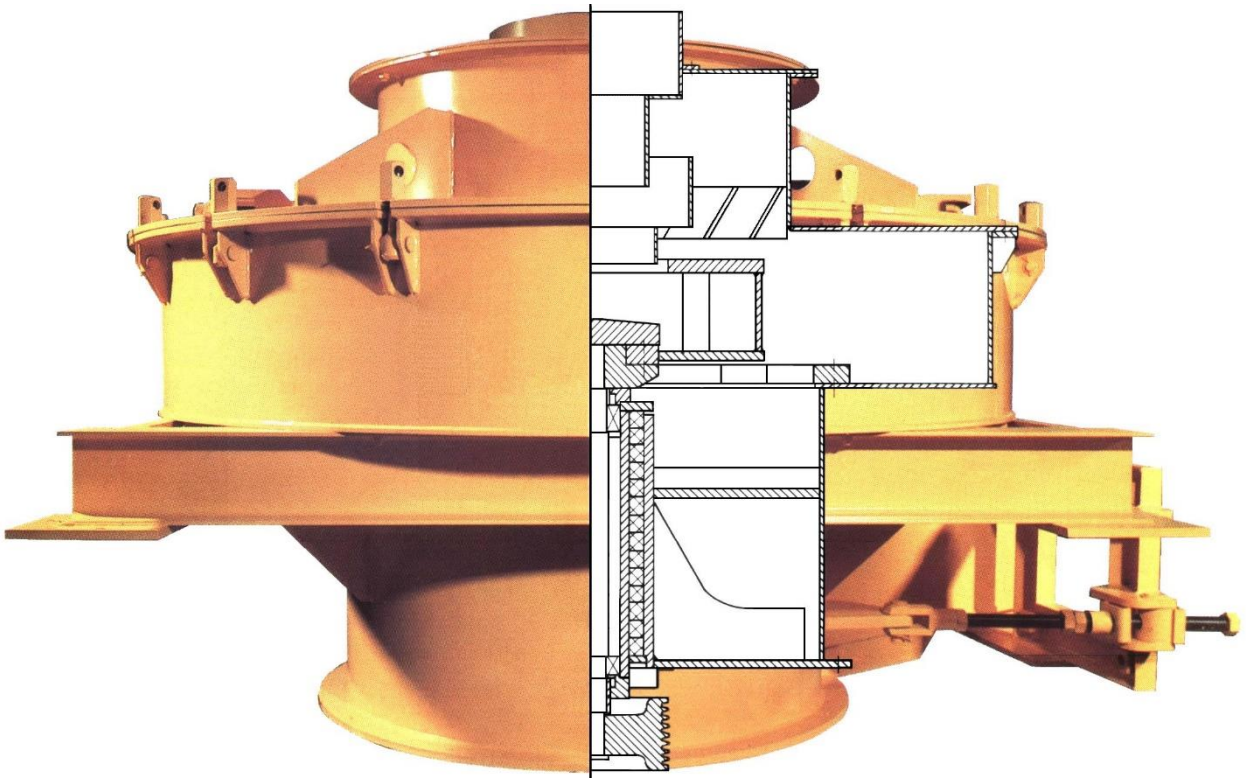


Рис. 25. Центробежная отражательная мельница.

Для отходов низкой прочности используются суперскоростные дезинтеграторы (рис. 26), в которых два дисковых соосных ротора, обращенных друг к другу многорядно закрепленными ударными штырями, вращаются в противоположные стороны со скоростью около 15000 об/мин. Питание таких дезинтеграторов в среднем до 5 мм, а крупность продукта можно доводить до 5 мкм.

Более широкое использование приобретают валковые гидропрессы (рис. 27). По сути это валковые мельницы, один из валков которых с большим усилием прижимается к другому через слой измельчаемого материала. Происходит внутрислойное принудительное самоизмельчение и сыпучий в питании материал выходит из мельницы частично в виде брикетов, которые затем нужно разрушать и доизмельчать вместе со скрытыми внутри них крупными нераздробленными кусками. Стоимость таких мельниц значительно превышает $1 млн., поэтому их целесообразно устанавливать

перед большими шаровыми мельницами с целью повышения их производительности на 35 %. В таких условиях гидропрессы окупаются за 2 года за счет экономии энергии и мелющих тел.

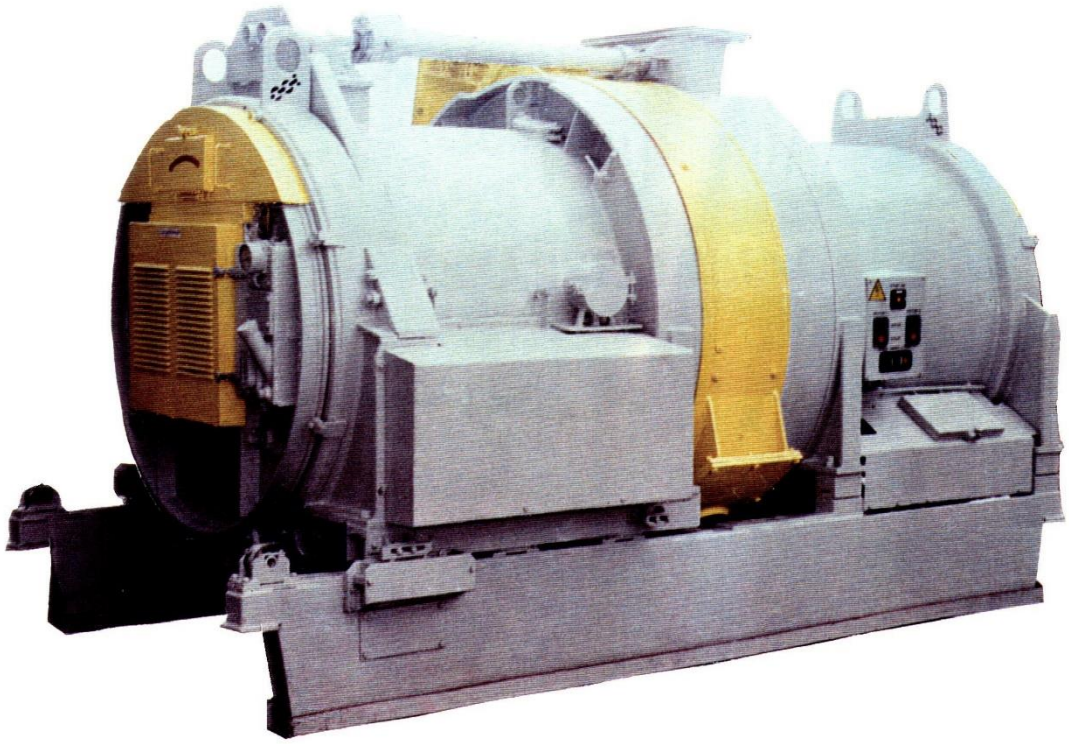
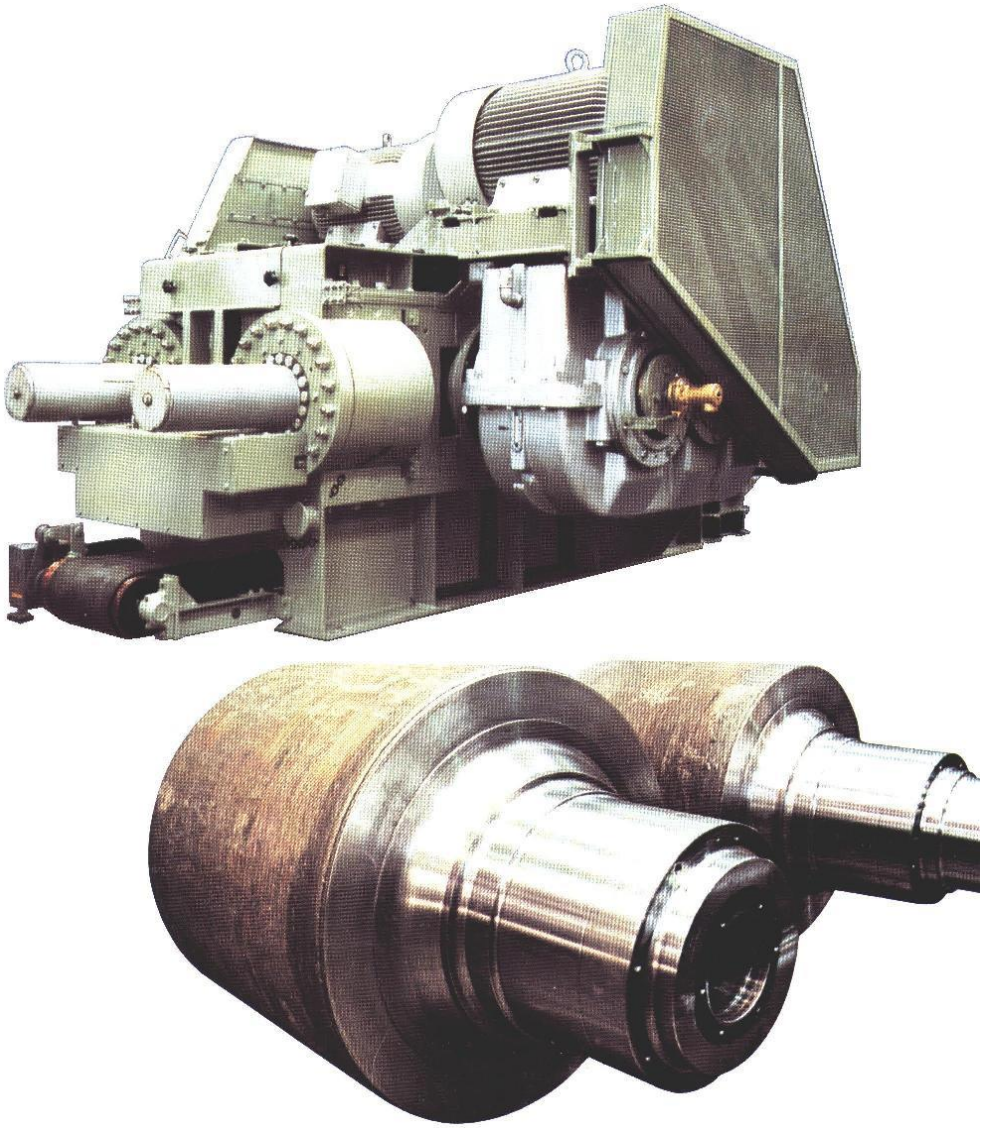


Рис. 26. Дезинтегратор.

Вибрационные конусные дробилки (КИД) (рис. 28) успешно выполняют роль мельниц, обеспечивая грубый или тонкий помол в сухом или мокром режимах материалов любой прочности от отходов режущего инструмента и абразивов до отходов растительного происхождения. Принимая крупные куски до 100 мм, они могут при степени дробления 30 измельчать материал мельче 5 мм в открытом цикле при гранулометрическом составе близком к продукту стержневой мельницы и при такой же производительности. В замкнутом цикле в них можно получать такой же продукт, как в шаровой мельницы. При этом затраты электроэнергии снижаются в 2 раза, износ мелющих тел – в 20 раз, а производственные площади – в 5 раз. Технологические параметры виброконусных мельниц легко регулируются преобразователем частоты и силы воздействия мелющих тел на слой материала.



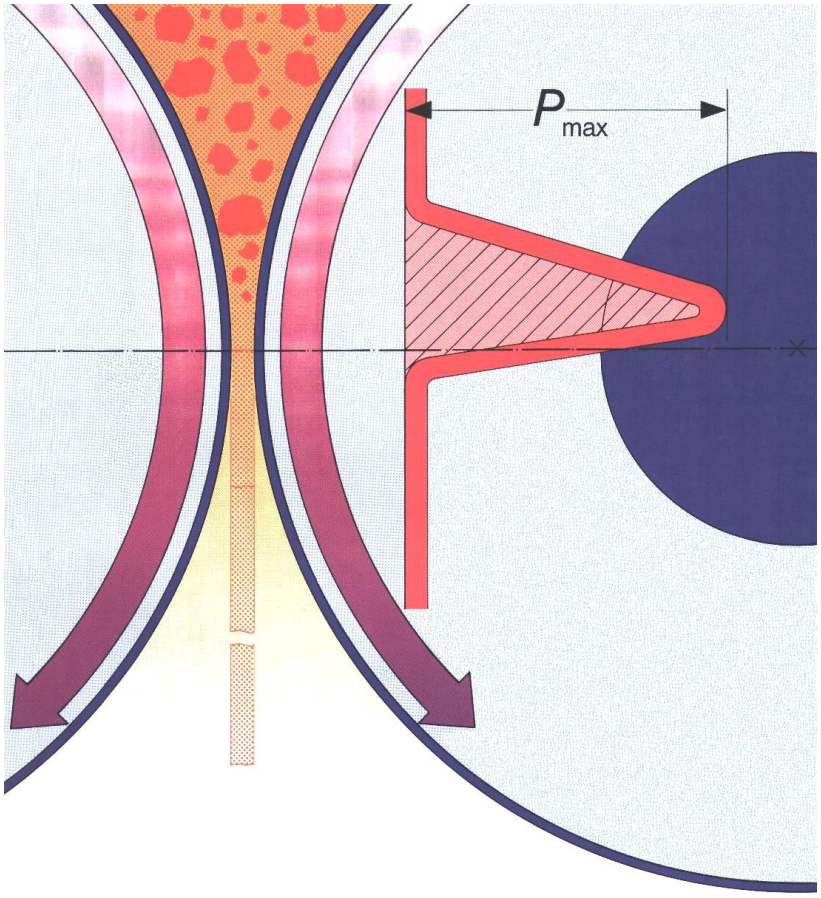


Рис. 27. Валковый гидропресс.

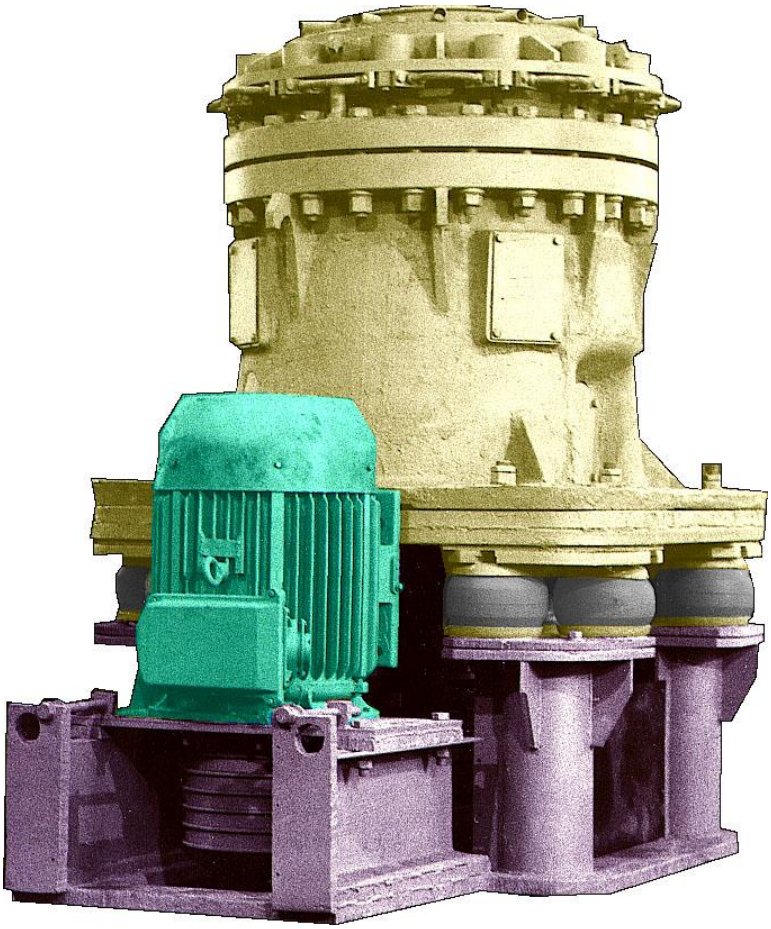


Рис. 28. Вибрационная конусная дробилка (КИД).

Благодаря вибрациям мелющих тел продукт не превращается в брикеты как в гидропрессах, а имеет вид сыпучего. Разрушение осуществляется преимущественно по дефектным поверхностям, что упрощает выделение из измельченных отходов полезных компонентов. Иными словами здесь имеет место селективность раскрытия сростков компонентов.

Другим полезным свойством виброконусных мельниц является их способность загружаться непосредственно из бункера без применения дозирующих питателей. При этом их пуск и остановка осуществляется под нагрузкой.

По комплексу преимуществ виброконусные мельницы существенно превосходят известные мельницы всех типов.

1.4. Грохоты

Грохот представляет собой устройство (машину или аппарат), предназначенное для разделения кускового и сыпучего материалов, а также твердой фазы пульпы на продукты различной крупности с помощью просеивающих поверхностей с калиброванными отверстиями. По ряду технологий на грохотах обезвоживают продукты или совмещают операции промывки материала с последующим выделением из отмытой зернистой части мелких классов и обезвоживание.

Грохоты широко используют в горнорудной промышленности для разделения материалов на классы перед дроблением, промывки материала перед обогащением в тяжелых средах и последующей отмывки суспензий, обезвоживания продуктов обогащения. Для аналогичных целей грохочение используют в горно-химической, угольной промышленности и при производстве строительных материалов. В последних двух случаях грохоты применяют для разделения готового продукта (угля, щебня, гравийно-песчаных масс) на кондиционные товарные классы перед отправкой потребителям. В металлургической промышленности на грохотах удаляют некондиционную по крупности мелочь из сырых окатышей, после обжига которых эту операцию повторяют. Аналогичную операцию выполняют и с агломератом после спекания, сначала горячим, а затем охлажденным. Перед доменной плавкой контрольному грохочению для удаления мелочи подвергают все сырьевые материалы, загружаемые в печь.

При переработке почти всех промышленных отходов обязательно используются различные типы грохотов.

Вибрационное грохочение применяют при подготовке тонкоизмельченного сырья к последующему прессованию и спеканию в абразивном, огнеупорном, керамическом, электродном и других производствах, базирующихся на порошковой технологии. Более новое применение вибрационного грохочения – разделение тонкоизмельченной твердой фазы различных пульп.

На вибрационных грохотах материал разделяется по крупности (или обезвоживается) в процессе вибрационного перемещения по просеивающей поверхности. Это является характерным, но не основным признаком вибрационного грохота, поскольку такое перемещение реализуется в целой группе грохотов, которую принято называть плоскими подвижными грохотами с колебательным движением просеивающей поверхности.

Класс вибрационных грохотов выделяется из названной группы типом привода или, более строго, способом возбуждения колебаний. Таким образом, вибрационный грохот – это грохот с вибрационным приводом, который в отличие от жесткого кинематического привода называют динамическим (или силовым). Принципиальная особенность вибрационного грохота как раз и состоит в том, что при используемом в нем динамическом приводе характер колебательного движения, амплитуда и форма траекторий грохота определяются исключительно динамическими факторами – силовым воздействием, генерируемым приводом (вынуждающей силой), числом и массой движущихся элементов, а также числом, расположением и характеристиками упругих элементов. Вибрационный (или динамический) привод называют вибровозбудителем. В подавляющем большинстве конструкций грохотов используют центробежные (дебалансные) вибровозбудители с вращающейся неуравновешенной массой (инерционным элементом), гораздо реже – электромагнитные.

Одновальный дебалансный статически неуравновешенный вибровозбудитель (рис. 29, *а)* имеет дебаланс *1,* центр массы которого расположен в точке C_m. Он жестко связан с валом, вращающимся вокруг оси O в подшипниках, соединенных с корпусом *2*. Статический момент массы вибровозбудителя равен произведению $m\varepsilon$, где m – масса дебаланса; ε – эксцентриситет массы дебаланса. При вращении вибровозбудителя с угловой скоростью ω развивается центробежная вынуждающая сила $F = m\varepsilon\omega^2$, которая передается на корпус *2* через подшипники. Таким образом, в этом случае

вынуждающая сила F представляет собой вектор постоянного модуля, вращающийся с угловой скоростью ω.

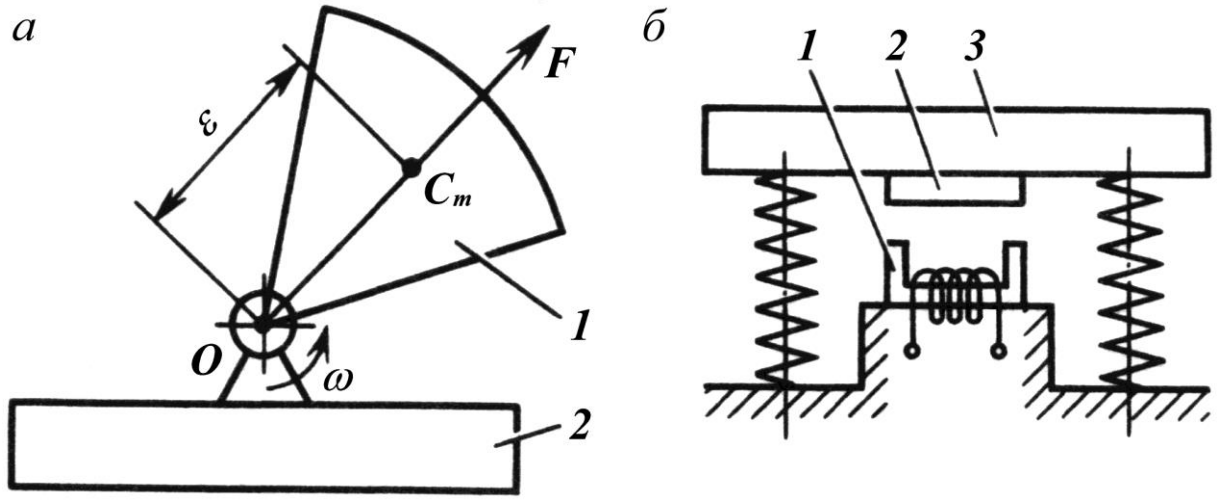


Рис. 29. Схемы вибровозбудителей колебаний:

а - центробежного (дебалансного); *б* – электромагнитного.

В электромагнитных вибровозбудителях (см. рис. 29, *б*) силы, вынуждающие колебания, создаются в результате воздействия переменного во времени магнитного поля на ферромагнитные тела.

При протекании по обмотке сердечника переменного тока в нем наводится магнитное поле с замкнутыми силовыми линиями. Возникающие между торцевыми сечениями сердечника *1* и якорем *2* поверхностные силы изменяются во времени и возбуждают колебания якоря и связанного с ним тела *3*. Электромагнитный вибровозбудитель генерирует вынуждающую силу направленного (прямолинейного) действия.

Независимо от способа возбуждения колебаний вибрационный грохот имеет ряд основных узлов (рис. 30). В данном случае на рис. 30 для примера показан грохот с дебалансным вибровозбудителем, приводимым во вращение от электродвигателя через клиноременную передачу. Грохот через упругие элементы в виде цилиндрических винтовых пружин опирается на опорную

раму или может быть упруго подвешен к перекрытию либо к специальному укрытию. В коробе грохота установлены и жестко закреплены два яруса сит.

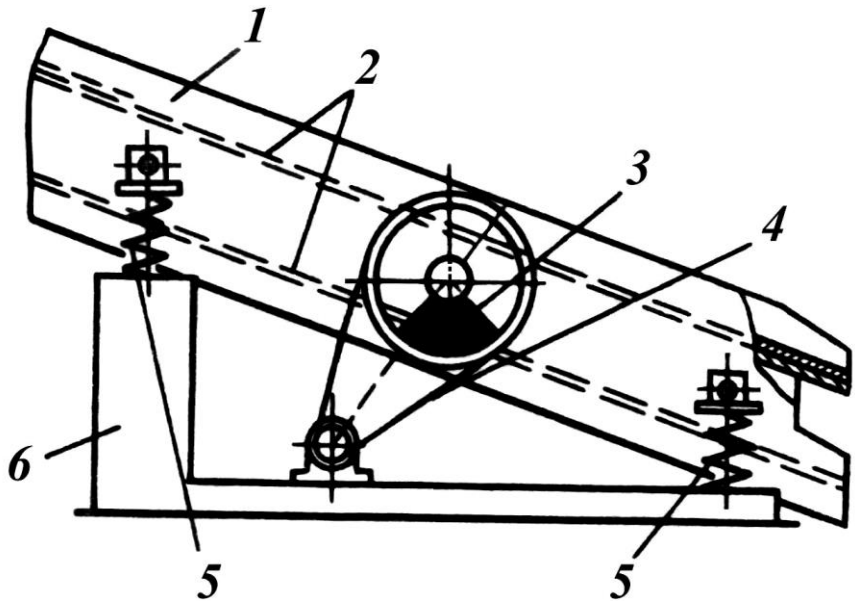


Рис. 30. Схема вибрационного грохота:

1 – короб; *2* – просеивающая поверхность; *3* – вибровозбудитель;

4 – приводное устройство; *5* – упругие виброизолирующие элементы;

6 – опорная рама.

По динамическим признакам вибрационные грохоты подразделяются:

по способу возбуждения колебаний: с дебалансным вибровозбудителем; с электромагнитным вибровозбудителем;

по числу вибровозбудителей: с одним, двумя и т. д.;

по способу синхронизации работы вибровозбудителей (если их более одного): с принудительной механической синхронизацией; самосинхронизацией; с принудительной электрической синхронизацией;

по числу колеблющихся масс: одно-, двух- и трехмассные;

по соотношению вынуждающей и собственной частот колебаний: дорезонансные, резонансные и околорезонансные, зарезонансные, межрезонансные;

по форме колебаний рабочего органа – короба: с круговыми и близкими к ним; эллиптическими; прямолинейно направленными; комбинированными (неоднородным полем колебаний).

С точки зрения приведенных здесь признаков грохот, изображенный на рис. 30, является одномассным зарезонансным с круговыми колебаниями, возбуждаемыми одним дебалансным вибровозбудителем.

По технологическим признакам вибрационные грохоты различаются по числу установленных на них просеивающих поверхностей: одно-, двухситные и т. д.; расположению просеивающих поверхностей относительно горизонта: наклонные (угол наклона α = 15-30°) и горизонтальные или слабонаклонные (α = 5-6°).

Целесообразно также характеризовать грохот по наличию перемещений просеивающих поверхностей в целом или отдельных их элементов относительно короба грохота (с неподвижными просеивающими поверхностями и активными просеивающими поверхностями).

Таким образом, полную характеристику грохота (см. рис. 30) можно расширить: он является двухситным наклонным с неподвижными относительно короба просеивающими поверхностями.

Подавляющее большинство выпускаемых и эксплуатируемых в настоящее время в России и за рубежом вибрационных грохотов являются одномассными зарезонансными машинами с дебалансными вибровозбудителями.

Для получения круговых и близких к ним колебаний используют дебалансный вибровозбудитель (рис. 31, *а*), аналогичный изображенному на рис. 29. При установке его в центре тяжести *О* грохота создается однородное поле колебаний. Для нормального вибрационного транспортирования материала грохот этого типа должен иметь значительный наклон (α = 15-30°) просеивающих поверхностей к горизонту (см. рис. 31, *а*).

Основное отличие грохота, изображенного на рис. 31, *б,* состоит в том, что в нем установлены два идентичных дебалансных вибровозбудителя с

параллельно расположенными осями. Вибровозбудители вращаются с одинаковой угловой скоростью ω в противоположных направлениях (рис. 32). Вынуждающая сила F каждого из дебалансных возбудителей может быть разложена на две составляющие, одна из которых F_x направлена по оси Ox, а вторая F_y – по оси O_y , совпадающей с линией центров O_1O_2. Взаимная фазировка вибровозбудителей такова, что в любой момент времени их углы поворота φ_1 и φ_2 равны, и составляющие F_y вынуждающей силы постоянно взаимно компенсируются, а устройство в целом сообщает грохоту направленные (прямолинейные) колебания вдоль оси Ox, возбуждаемые силой, которая является равнодействующей двух составляющих F_x.

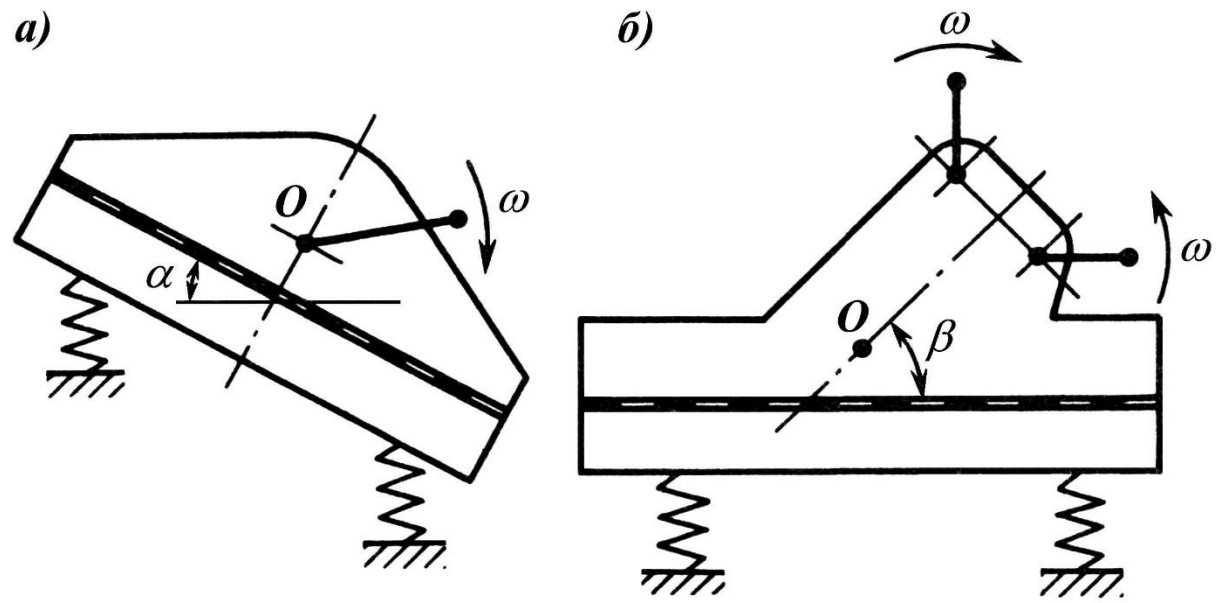


Рис. 31. Динамические схемы одномассных зарезоиаисных грохотов с дебаланснымн вибровозбудителями:

а – наклонный грохот с круговыми и близкими к ним колебаниями;

б – горизонтальный грохот с прямолинейными колебаниями.

Просеивающие поверхности в таких грохотах располагают горизонтально или для улучшения транспортирования материала с небольшим наклоном (а = 5-6°). Угол β (см. рис. 31, *б)* между линией действия

вынуждающего усилия сдвоенного вибровозбудителя и просеивающей поверхностью устанавливают в пределах 35-45°. Вибровозбудители могут быть расположены выше или ниже просеивающей поверхности, но в любом случае для получения однородного поля колебаний результирующая вынуждающая сила должна проходить через центр тяжести грохота *O*.

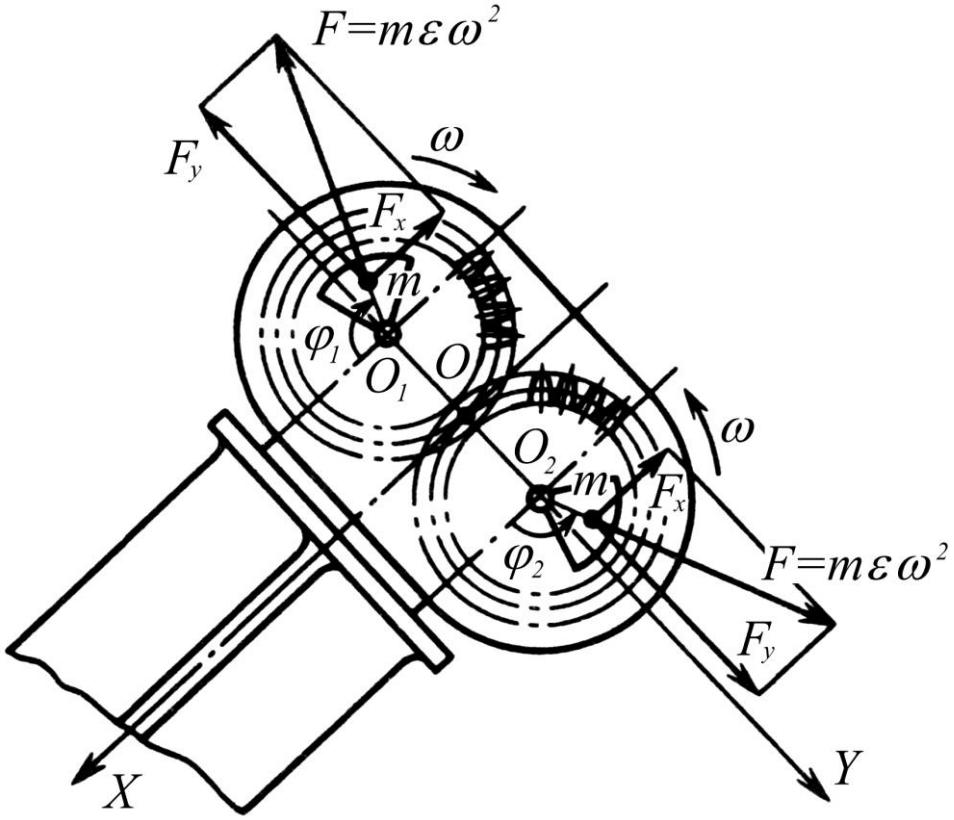


Рис. 32. Самобалансный вибровозбудитель направленных колебаний с синхронизирующим зубчатым зацеплением.

Для синхронизации вращения двух дебалансных вибровозбудителей в подобных устройствах долгое время устанавливалось зубчатое зацепление, как это показано на рис. 32. Такой сдвоенный вибровозбудитель, генерирующий направленную вынуждающую силу, называют самобалансным. Это же название укрепилось и за соответствующим типом грохотов, несмотря на то, что в большинстве современных их конструкций используется явление самосинхронизации, не требующее установки между вибровозбудителями каких-либо кинематических принудительно

синхронизирующих элементов, в том числе и зубчатых зацеплений. Синхронность и требуемая фазировка вибровозбудителей, не связанных между собой кинематически и приводимых от двух автономных электродвигателей, в этом случае достигается автоматически, благодаря внутренним свойствам самой колебательной системы.

Вибрационные грохоты, являющиеся одномассными зарезонансными машинами с дебалансными вибровозбудителями, в России стандартизированы. Действующий в настоящее время ГОСТ 23788-79 Е подразделяет грохоты на три типа в зависимости от насыпной плотности грохотимого материала:

Л – легкий, для грохочения сыпучих материалов с насыпной плотностью до 1,4 т/м^3;

С – средний, для грохочения сыпучих материалов с насыпной плотностью до 1,8 т/м^3;

Т – тяжелый, для грохочения сыпучих материалов с насыпной плотностью до 2,8 т/м^3.

Грохоты легкого типа предназначены главным образом для угольной промышленности, среднего – для промышленности строительных материалов, тяжелого – для горнорудной промышленности.

Стандарт разделяет грохоты также по форме (траектории) колебаний на следующие виды:

И – с круговыми или близкими к ним колебаниями (см. рис. 31, *а*);

С – с прямолинейными колебаниями (см. рис. 31, *б*);

ИС – с близкими к прямолинейным колебаниями (см. рис. 31, *б).*

Это разделение одновременно дает представление и о других признаках грохота: расположении просеивающей поверхности относительно горизонта и числе установленных на грохоте вибровозбудителей. Таким образом, буква И в обозначении грохота (инерционный) указывает, что это наклонный грохот с круговыми или близкими к ним колебаниями, возбуждаемыми центробежным вибровозбудителем. Буквой С (самобалансный) обозначают горизонтальные

или слабонаклонные грохоты с прямолинейными колебаниями, возбуждаемыми самобалансным вибровозбудителем с кинематической синхронизацией двух дебалансных валов (зубчатым зацеплением) или двумя самосинхронизирующимися дебалансными вибровозбудителями. Обозначение ИС, по существу, идентично обозначению С, с той лишь разницей, что в грохотах типа ИС используются исключительно самосинхронизирующиеся вибровозбудители.

В структуру условного обозначения грохота по стандарту входит:

сокращенное наименование грохота Г;

обозначение траектории колебаний (И, С, ИС);

обозначение типа грохота (Л, С, Т);

обозначение ширины просеивающей поверхности: 2 – 1000 мм; 3 – 1250 мм; 4 – 1500 мм; 5 – 1750 мм; 6 – 2000 мм; 7 – 2500 мм; 8 – 3000 мм; 9 – 3500 мм; 10 – 4000 мм;

число ярусов сит;

индекс модификации (буквенный или цифровой).

Приведем пример условного обозначения весьма распространенного в горнорудной промышленности наклонного вибрационного грохота тяжелого типа с круговыми колебаниями, шириной просеивающей поверхности 1750 мм и одним ситом: грохот инерционный ГИТ51М. После модернизации грохот выпускается с индексом М.

Приведем также условное обозначение горизонтального вибрационного грохота легкого типа с колебаниями, близкими к прямолинейным, шириной просеивающей поверхности 2000 мм и двумя ярусами сит: грохот инерционный ГИСЛ62.

На рис. 30 и 31, *а* схематически показаны грохоты, которые могут быть обозначены ГИЛ, ГИС или ГИТ, а на рис. 31, *б* – ГСЛ, ТСС или ГСТ, а также ГИСЛ, ГИСС или ГИСТ.

Ниже на рис. 33 показаны общие виды грохотов, применяемых для грубого и тонкого грохочения при переработке промышленных отходов.

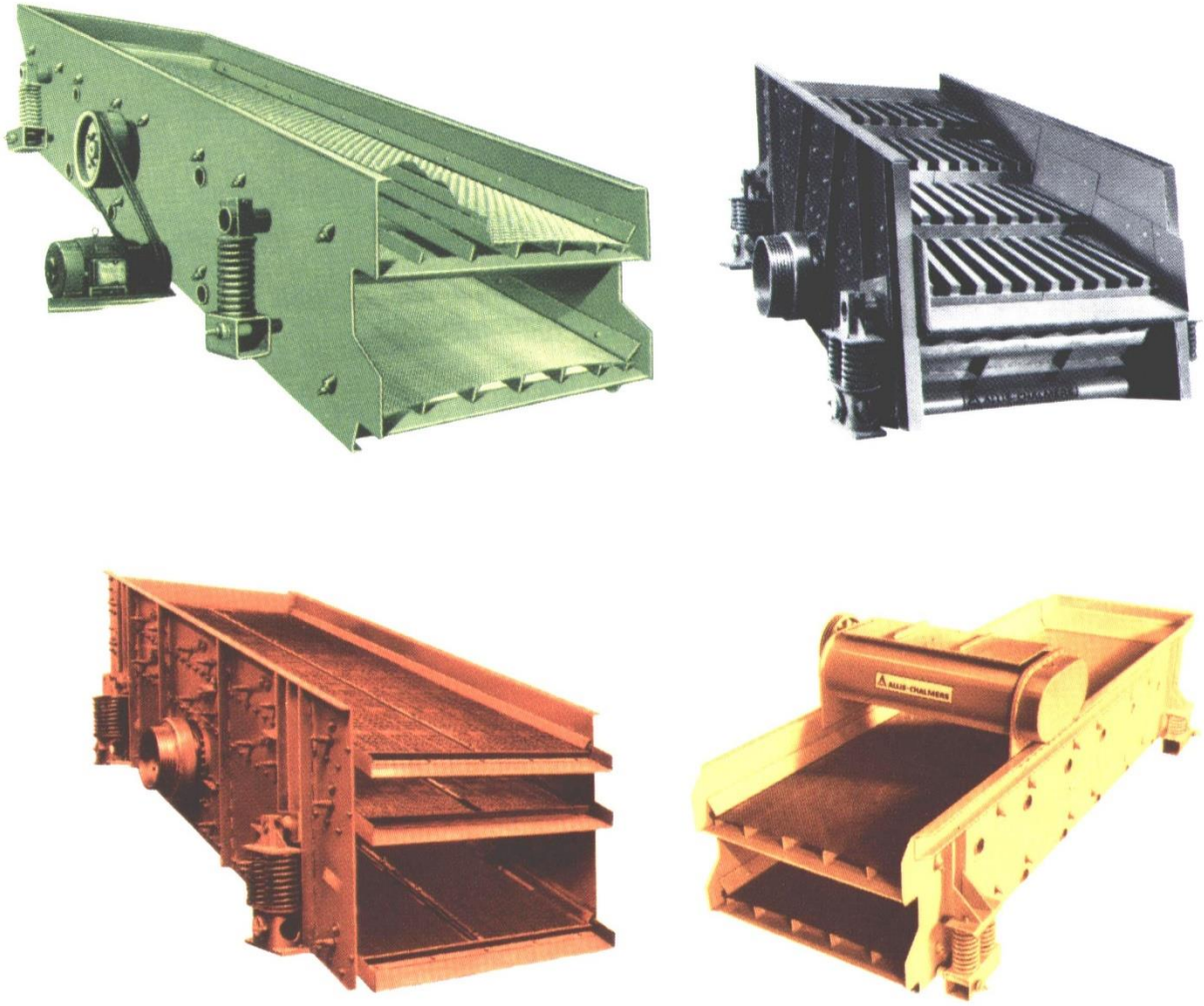


Рис. 33. Грохота, применяемые при переработке промышленных отходов.

1.5. Магнитные сепараторы

Процессы магнитного обогащения основаны на различии магнитных свойств разделяемых компонентов и находят применение для обогащения руд и промышленных отходов. Во втором случае они чаще всего используются при переработке металлургических шлаков, сортировке стружки, при регенерации литейных песков, огнеупоров, абразивов и керамики.

В настоящее время разделение материалов по магнитным свойствам осуществляется главным образом в постоянном магнитном поле. Наряду с магнитными свойствами разделяемых частиц на показатели разделения влияют их плотность, крупность, форма и влажность. Поэтому для решения технологической задачи необходимо учитывать эти свойства и подбирать соответствующую конструкцию магнитного сепаратора. Их принципиальные схемы показаны на рис. 34 [10].

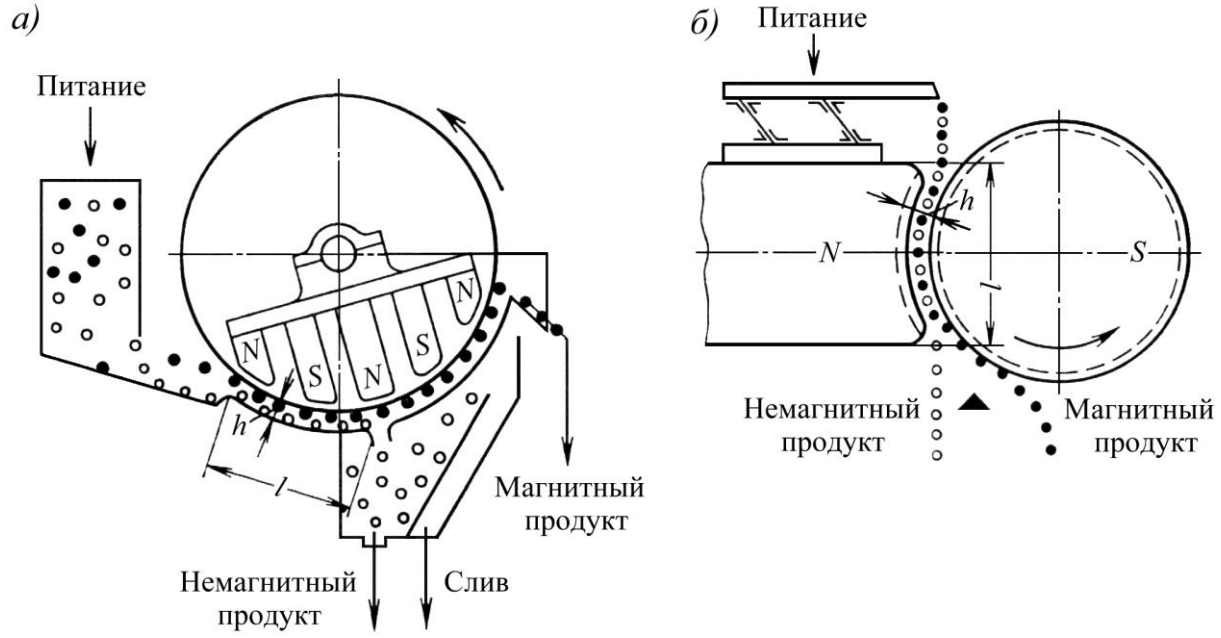


Рис. 34. Рабочие зоны сепараторов с открытой многополюсной магнитной системой (со слабым полем) и замкнутой электромагнитной системой (с сильным полем):

а – рабочая зона барабанного сепаратора; *б*–то же валкового сепаратора.

В практике магнитного обогащения применяют следующую классификацию минералов по их магнитным свойствам:

1. *Сильномагнитные минералы*, извлекаемые на магнитных сепараторах с относительно слабым магнитным полем напряженностью до 120 кА/м. Эти минералы имеют удельную магнитную восприимчивость вещества $\chi > 4 \cdot 10^{-5}$ $м^3/кг$. К ним относятся магнетит (искусственный и естественный), маггемит, титаномагнетит, франклинит, и пирротин. Встречаются, однако, и слабомагнитные разновидности пирротина.

2. *Слабомагнитные минералы*, извлекаемые на магнитных сепараторах с сильным полем напряженностью 800-1500 кА/м и выше. Эта группа включает минералы с удельной магнитной восприимчивостью $\chi = (7{,}5\text{-}10) \cdot 10^{-8}$ $м^3/кг$: окислы, гидроокислы и карбонаты железа и марганца, ильменит, вольфрамит, гранат, биотит и др. Нижний предел удельной магнитной восприимчивости минералов, извлекаемых на сепараторах с сильным полем, имеет тенденцию к понижению по мере совершенствования конструкций магнитных сепараторов.

3. *Немагнитные минералы*, не извлекаемые при магнитном обогащении, удельная магнитная восприимчивость χ которых меньше 10^{-7} $м^3/кг$. К ним относятся кварц, кальцит, касситерит, апатит и др.

Для определения магнитных свойств минералов применяют баллистический, магнитный и пондеромоторный методы. Первые два метода – для сильномагнитных, третий – для сильномагнитных, слабомагнитных и немагнитных минералов.

Валковые сепараторы ЭВС обеспечивают выделение в магнитный продукт слабомагнитных частиц с удельной магнитной восприимчивостью порядка $5 \cdot 10^{-6}$ $см^3/г$ и более.

Простота эксплуатации, высокие эффективность и надежность обеспечиваются конструктивной схемой сепараторов, при которой отсутствует холостой воздушный зазор между рабочим органом и магнитопроводом.

Сепараторы типа ЭВС (рис. 35) отличаются от известных сепараторов способом подачи питания в рабочую зону, увеличенным диаметром валков, оригинальным профилем рабочих поверхностей валков и полюсных наконечников.

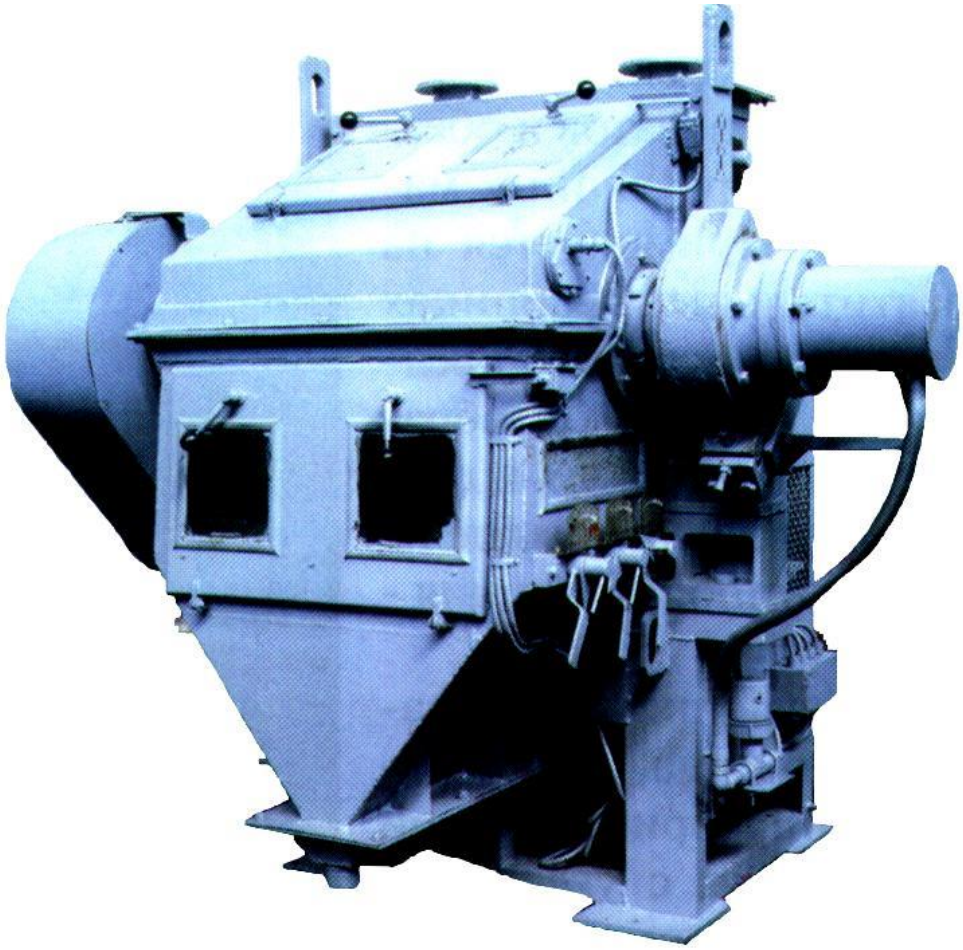


Рис. 35. Валковый сепаратор ЭВС.

Все чаще используются валковые сепараторы на постоянных магнитах – ПВС и сепараторы для мокрого обогащения – ЭВМ (рис. 36).

Валковые сепараторы типа ЭВС с нижней подачей питания предназначены для сухого обогащения зернистых материалов крупностью 0,075-4 мм, а также для очистки различных материалов, таких как отработанные электрокорунды, литейные кварцевые пески, огнеупоры, сухие

строительные смеси, шлаки и т. д. В табл. 2 показаны технические характеристики валковых сепараторов.

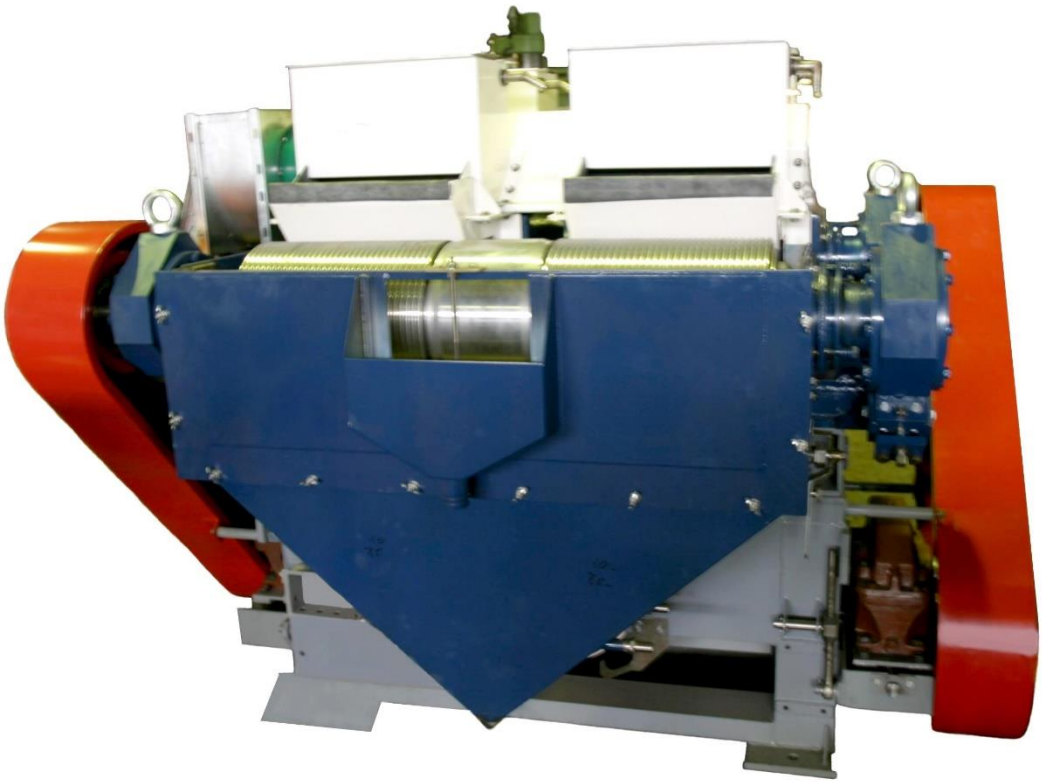


Рис. 36. Валковый сепаратор ЭВМ для мокрого обогащения.

Валковые сепараторы ЭВС-В (рис. 37) с верхней подачей питания предназначены для сухого обогащения и очистки тонкоизмельченных (крупностью менее 0,075 мм) и плохосыпучих материалов и порошков отходы графита, асбеста, электрокорунда и т. п.), а также для глубокой очистки зернистых материалов и порошков крупностью 0,075-0,5 мм (литейный кварцевый песок, кварцевая крупка, полевой шпат и т. п.), содержащих небольшое (до 1 %) количество слабомагнитных примесей.

Анализ данных табл. 3 показывает, что более высокая эффективность очистки достигается на сепараторе с верхней подачей питания, обеспечивающем существенно больший выход марки высшего сорта.

Таблица 2

Технические характеристики валковых сепараторов

Параметры	**ПВС-28/10**	**ЭВС-10/5**	**ЭВС 28/9**	**ЭВС-36/50**	**2ЭВС-36/100**	**ЭВС-В-28/9**	**ЭВС-В-36/50**	**ЭВМ-36/50**	**2ЭВМ-36/100**
Диаметр валка , мм	280	100	280	360	360	280	360	360	360
Длина валка, мм	100	50	90	500	1000	100	500	500	1000
Количество валков	1	1	1	1	2	1	1	1	2
Крупность обогащаемого материала, мм	0,02-12	0,02-2	0,075-4	0,75-4	0,075-4	0,02-0,5	0,02-0,5	0,1-4	0,1-4
Количество продуктов сепарации	3	2	4	4	4	2	2	2	2
Индукция магнитного поля на зубцах валка, Тл	0,8	1,7	1,8	1,8	1,7	1,5	1,5	1,7	1,7
Производительность, т/ч	0,2-1,0	0,001-0,002	0,3-0,5	1,5-3	6-12	0,1-0,3	0,5-1,5	1,5-2,5	6-10
Мощность возбуждения поля, кВт	-	0,5	0,75	81,7	8,1	0,75	1,7	1,8	8,1
Мощность электродвигателя, кВт	0,37	0,18	1,5	7,5	15,0	1,5	7,5	4,0	11,0
Габаритные размеры, мм									
длина	1020	540	850	2100	2700	830	2000	1900	2600
ширина	750	340	1400	1600	2300	1230	1550	1500	2000
высота	1370	550	1800	1850	2000	1600	2050	2000	2200
Масса, т	0,26	0,075	1	4	8	1	4	4	8



Рис. 37. Валковый сепаратор ЭВС-В.

Валковый сепаратор ПВС на постоянных магнитах (неодим-железо-бор) предназначен для сухого обогащения материалов крупностью 0,02-12 мм, перечисленных выше. При этом обеспечивается существенно более высокая эффективность сепарации по сравнению с сепараторами ЭВС и ЭВС-В.

Сепаратор значительно меньше по габаритам и массе, потребление электроэнергии также значительно ниже.

Таблица 3

Сравнительные результаты очистки шлифпорошка белого электрокорунда на сепараторах с нижней и верхней подачей питания (Бокситогорский глиноземный завод)

Производительность 0,2 т/ч; крупность –50 мкм

Продукты	Выход, %	Массовая доля магнитной фракции, %	Извлечение магнитной фракции, %	Выход марки высшего сорта, %
Сепаратор ЭВС-28/9				
Магнитный	0,12	35,00	0,63	
Немагнитный	99,88	6,63	99,37	53,3
Питание	100,00	6,66	100,00	
Сепаратор ЭВС-В-28/9				
Магнитный	0,26	25,00	1,01	
Немагнитный	99,74	6,36	98,99	90,0
Питание	100,00	6,41	100,00	

Данные табл. 4 показывают, что сепаратор ПВС-28/10 обеспечивает существенно более высокое извлечение магнитной фракции в магнитный продукт по сравнению с сепаратором ЭВС-28/9, при этом производительность сепаратора ПВС-28/10 в два раза выше.

Валковые сепараторы ЭВМ предназначены для мокрого обогащения зернистых материалов крупностью 0,1-4 мм. Они разработаны на базе сепараторов ЭВС при максимальной унификации узлов и деталей для упрощения производства.

Эффективность работы сепараторов 2ЭВМ-36/100 обеспечивается оригинальным профилем полюсных наконечников и валков, высокой магнитной индукцией, равномерным распределением питания по рабочей длине валка, антикоррозийным исполнением валков и полюсных наконечников, возможностью создания оптимального водного режима, простотой конструкции, удобством регулирования и эксплуатации.

Таблица 4

Сравнительные результаты обогащения отвалов ставролито-циркония на сепараторах ПВС и ЭВС

Крупность –0,2 мм; удельная магнитная восприимчивость ставролита (15-20)·10^{-8} $м^3$/кг

Производительность, т/ч	Продукты	Выход, %	Массовая доля магнитной фракции, %	Извлечение магнитной фракции, %
Сепаратор ПВС-28/10				
5,0	Магнитный	26,61	99,34	95,68
	Немагнитный	63,19	1,63	4,32
	Питание	100,00	27,63	100,00
Сепаратор ЭВС-28/9				
2,4	Магнитный	25,23	99,51	90,33
	Немагнитный	74,47	3,65	9,67
	Питание	100,00	28,12	100,00

Электромагнитные высокоградиентные сепараторы

Сепараторы ЭРМ (рис. 38), разработанные институтом вместе с «Гипромашобогащение», предназначены для мокрого обогащения и очистки тонкоизмельченных материалов и порошков крупностью 0,02-0,075 мм, а также зернистых материалов и порошков крупностью 0,075-0,5 мм (слабомагнитные материалы, полевой шпат и т. п.) (табл. 5).

Конструкция сепаратора 2ЭРМ-5/100 и 4ЭРМ-20/160 обеспечивает возможность осуществления в одном сепараторе различных технологических схем. Предусмотрены параллельная подача питания во все рабочие зоны, а также перечистка в нижних зонах сепаратора немагнитных или магнитных продуктов, выделяемых в верхних зонах. Сепараторы имеют антикоррозийное исполнение.

По результатам изготовления и опытно-промышленной эксплуатации выполнена корректировка технической документации с целью повышения надежности работы сепараторов и технологичности их изготовления.



Рис. 38. Высокоградиентный сепаратор 2ЭРМ-5/100.

Исследования гидродинамики протекания пульпы через ферромагнитные тела (зубчатые пластины) показали, что скорость протекания пульпы оказывает существенное влияние на технологические результаты работы сепараторов. Институтом предложены оригинальные способы регулирования скорости протекания пульпы через ферромагнитные тела – с помощью подпорных камер.

Установка подпорных камер под ферромагнитными телами позволяет получать при зазоре 3,5 мм такие же результаты, как при зазоре 1,85 мм, чем облегчается защита рабочей зоны от забивания и обеспечивается значительное повышение надежности сепаратора.

Таблица 5

Технические характеристики высокоградиентных сепараторов

Параметры	**ЭРМ-3,5/100**	**2ЭРМ-5/100**	**4ЭРМ-20/160**
Диаметр ротора, мм	1000	1000	1600
Количество роторов	1	1	2
Количество рабочих зон	1	2	4
Размер рабочей зоны, мм			
длина полюса по хорде	350	500	1000
высота пакета ферромагнитных тел	150	150	150
ширина	100	100	200
Крупность обогащаемого материала, мм	00,2-0,7	0,02-0,7	0,02-0,7
Массовая доля твердого в исходном продукте, %, не более	50	50	50
Расход воды, $м^3$/ч, не более	10	20	160
Средняя индукция магнитного поля в рабочей зоне, Тл	1,4	1,4	1,3
Производительность, т/ч	До 5	До 10	До 100
Мощность возбуждения поля, кВт	10	32	82
Мощность электродвигателя, кВт	1,5	3,0	22
Габаритные размеры, мм			
длина	2760	2800	5930
ширина	1450	1670	2990
высота	2810	3370	5470
Масса, т	5,8	13,5	69,2

Установка подпорных камер дает возможность решить и другую важную проблему – извлечение в магнитный продукт весьма слабомагнитных минералов, например, лопарита с магнитной восприимчивостью около $5 \cdot 10^{-6}$ $см^3/г$.

Сепаратор ЭРМ-3,5/100 с установкой подпорных камер обеспечивает выделение магнитного продукта с массовой долей 6,05 % при извлечении 82,89 %.

Высокоградиентные сепараторы большой единичной производительности используются в принципиально новых комбинированных схемах в сочетании с гравитационными и флотационными методами обогащения отходов.

В этих случаях на магнитное обогащение поступает сравнительно бедный, но содержащий небольшое количество сростков продукт, при сепарации которого выделяются отвальные хвосты. Как правило, выход магнитного продукта получается небольшим, поэтому можно обеспечить его эффективную доводку на концентрационных столах, а затем, после сушки, – на сухих валковых сепараторах типа ЭВС, обеспечивающих получение кондиционных порошков при высокой очистке.

Промышленное использование высокоградиентных магнитных сепараторов подтверждает возможность значительного повышения извлечения ценных компонентов из отвалов промышленных предприятий за счет снижения границы эффективного обогащения тонких классов слабомагнитных компонентов с 74 до 20-30 мкм.

Барабанные сепараторы

Магнитные сепараторы ПБС (рис. 39) и электромагнитные сепараторы ЭБМ (рис. 40) (табл. 6) обеспечивают выделение в магнитный продукт сильномагнитных частиц, например, аппаратного железа.

Магнитные сепараторы ПБС предназначены для сухого обогащения и очистки пылевидных зернистых материалов крупностью 0,02-6 мм (сварочные

флюсы, ванадийсодержащие шлаки, металлические и неметаллические порошки и т. п.).



Рис. 39. Магнитный сепаратор ПБС.

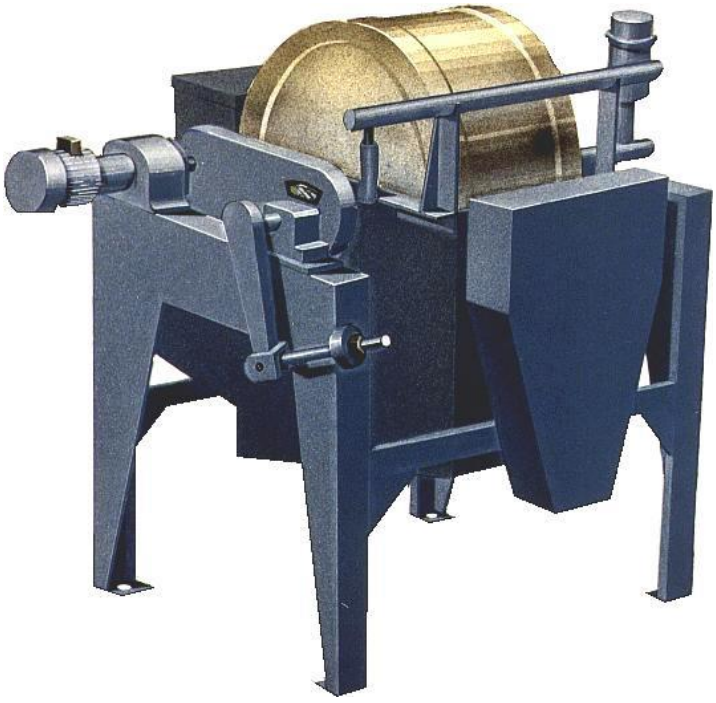


Рис. 40. Электромагнитный сепаратор ЭБМ.

Таблица 6

Технические характеристики барабанных сепараторов

Параметры	**ПБС-40/10**	**ПБС-63/50**	**ЭБМ-90/10**	**ЭБМ-90/60**
Диаметр барабана, мм	400	630	900	900
Длина рабочей части барабана, мм	100	500	100	600
Количество барабанов	1	1	1	1
Крупность обогащаемого материала, мм	0,02-6	0,02-6	0,02-6	0,02-6
Магнитная индукция на поверхности барабана, Тл	0,12	0,13	0,2	0,2
Производительность, т/ч	До 0,5	До 6	До 2	До30
Мощность возбуждения поля, кВт	-	-	2,7	5
Мощность электродвигателя, кВт	0,4	1,1	1,1	1,1
Габаритные размеры, мм				
длина	600	900	1400	1660
ширина	950	1300	1700	1620
высота	1700	1400	1600	1580
Масса, т	0,27	0,55	1,1	1,5

Электромагнитные барабанные сепараторы ЭБМ предназначены для мокрого обогащения и очистки материалов крупностью 0,02-6 мм (металлические и неметаллические порошки), а также для регенерации суспензий.

1.6. Электрические сепараторы*

Электрическая сепарация (обогащение, классификация и обеспыливание материалов) основана на различии электрофизических свойств разделяемых компонентов.

Электрическая сепарация применяется для обработки сыпучих материалов крупностью до –5 мм, переработка которых другими методами малоэффективна (компоненты близки по плотности, магнитным или физико-химическим свойствам) или неприемлема с экономической или экологической точки зрения. Особенно перспективна электрическая сепарация в маловодных районах.

Электрическая классификация основана на различном поведении в электрическом поле частиц минералов, отличающихся по крупности и форме. При электрической классификации наблюдается меньшая запыленность воздуха, так как пыль практически полностью удерживается электрическим полем.

Электрическую классификацию можно применять при обеспыливании и классификации металлических и неметаллических порошков, различных неорганических и органических веществ и др.

Электрические классификаторы можно использовать и как обогатительные аппараты, если минералы отличаются по форме (отделение слюды, асбеста и других материалов пластинчатой или волокнистой структуры от зернистой части) или если тонкозернистая часть исходного материала отличается по вещественному составу от крупнозернистой части (угольная зола, огнеупоры стекольных песков, шлаки).

Электрическая сепарация – процесс разделения частиц компонентов смеси с различными электрофизическими свойствами, в зависимости от которых под действием электрического поля изменяются траектории движения частиц.

---

* Глава составлена на основе работ А. И. Месеняшина

Электрическая сепарация по электрической проводимости (электропроводности) применяется для разделения компонентов с различным значением электрической проводимости.

Электропроводность материалов складывается из объемной и поверхностной составляющих. Значение объемной электропроводности частиц материалов изменяется в довольно широких пределах в зависимости от содержащихся в их составе примесей. Поскольку поверхностная электропроводность зависит не только от состава частиц материала, но и от состояния их поверхностей, колебания в значении общей электропроводности еще более велики. Все материалы по электропроводности условно могут быть разделены на три группы: проводники, полупроводники и непроводники, или диэлектрики.

Обогащение осуществляется успешно, если компоненты смеси разделяемых материалов значительно различаются по величине проводимости.

Хорошо разделяются материалы-проводники от полупроводников и непроводников. Несколько труднее отделить полупроводники от непроводников. Разделение же материалов одной группы на основе только естественных различий в электропроводности вызывает еще большие трудности.

Для разделения материалов, имеющих близкие по значению проводимости, применяют трибоэлектростатическую (или трибоэлектрическую) сепарацию. Этот способ основан на использовании трибоэлектрического эффекта или, точнее, контактной электризации.

В общем виде явление трибоэлектрического эффекта заключается в следующем. Если электрически нейтральную частицу одного частиц материала привести в соприкосновение с электрически нейтральной частицей другого материала или с какой-либо твердой поверхностью и затем прервать контакт, разъединив их, то на обеих соприкасающихся поверхностях возникнут различные по знаку электрические заряды. Поскольку площадь

контакта частиц мала, образующийся заряд невелик. При многократном повторении указанного элементарного акта и при условии, что этот контакт осуществляется каждый раз новыми участками поверхности (скорость утечки зарядов с частиц невелика), удается создать плотность поверхностного заряда, достаточную для сепарации в электростатическом поле высокой напряженности.

Способность контактирующих материалов и веществ к приобретению электрических зарядов определяется их природой, дефектами структуры кристаллической решетки и состоянием поверхности. Физической величиной, характеризующей процесс образования заряда, в частности, на минералах при контактной электризации, являются работа выхода электрона, которую необходимо затратить на преодоление сил, удерживающих электрон в решетке при выходе его из кристаллической решетки минерала. Количественных данных о значениях работы выхода электрона для минералов пока практически нет в связи с трудностью их экспериментального определения и теоретического расчета.

Диэлектрическая сепарация основана на различии в диэлектрической проницаемости разделяемых минералов.

Диэлектрическая сепарация заключается в том, что в неоднородном электрическом поле в среде с диэлектрической проницаемостью ε_c, промежуточной между диэлектрическими проницаемостями разделяемых минералов с ε_1 и ε_2, частицы с диэлектрической проницаемостью ε_1, большей ε_2, втягиваются области наибольшей напряженности, а частицы с проницаемостью ε_2, меньшей ε_c, наоборот, выталкиваются в направлении более слабых участков поля. Этим способом могут разделяться минералы с диэлектрическими проницаемостями, различающимися на 0,5-1 единицу.

Пироэлектрическая сепарация основана на свойстве небольшой группы кристаллических минералов, обладающих различными коэффициентами теплового расширения по различным осям кристаллов, поляризоваться при нагревании и охлаждении. Неодинаковые напряжения, возникающие в таких

кристаллах, вызывают образование локальных разноименных зарядов на противоположных концах кристалла.

Для минералов, в кристаллической решетке которых имеются электрические диполи, расположенные в определенных кристаллографических направлениях, в принципе возможна сепарация вследствие пьезоэлектрического эффекта, т. е. путем поляризации под действием механических напряжений. Использование этого эффекта в практических целях пока неизвестно.

Промышленное применение получили способы, основанные на разнице в электрической проводимости и в способности минералов к приобретению различных зарядов при контактной электризации. Процессы диэлектрической и пироэлектрической сепарации, имеющие ограниченное распространение, в отдельных случаях могут быть весьма эффективными.

При сепарации по электропроводности на процесс значительно влияют контактная электризация и в меньшей степени пондеромоторные силы, возникающие вследствие различия в диэлектрической проницаемости разделяемых минералов и воздушной среды. При трибоэлектрической сепарации в ряде случаев имеют место пироэлектрический и фотоэлектрический эффекты. Поэтому реальные процессы электрической сепарации по природе используемых электрических явлений весьма сложны и зависят от большого числа электрических свойств минералов.

Процесс электрической сепарации в общем виде можно условно разделить на три стадии: подготовка материала к сепарации, его зарядка и отделение заряженных частиц, друг от друга.

Зарядка (электризация) – важнейшая стадия для электрической сепарации. Она может осуществляться путем создания на частицах знака (положительного или отрицательного), а также путем создания на противоположных концах частицы поляризационных (связанных) или свободных зарядов разного знака.

Разделяемые минералы при электрической сепарации чаще всего заряжают избыточными зарядами, различными по величине и желательно (но не обязательно) по знаку. Известно несколько способов зарядки.

При сепарации по электропроводности зарядка возможна одним из следующих способов (или их комбинацией): касанием об электрод, находящийся под электрическим потенциалом, и ионизацией.

При соприкосновении частиц проводника с поверхностью электрода (рис. 41 *а*) минерал приобретает потенциал электрода. Частицы проводников практически сразу заряжаются до предельного значения. Частицы минералов-непроводников (диэлектриков) могут сохранять свой первоначальный заряд в течение десятков секунд или минут, однако ввиду конечных значений проводимостей постепенно разряжаются и также приобретают потенциал электрода. Помимо электрической проводимости скорость зарядки (или разрядки) частиц зависит от их формы и контактного сопротивления по отношению к электроду, а предельная величина заряда зависит от диэлектрической проницаемости, формы частиц и напряженности внешнего электрического поля. Для проводящего шарика радиусом r, касающегося электрода и находящегося в постоянном электрическом поле напряженностью E предельная величина заряда

$$q = -1{,}83 \cdot 10^{-10} Er^2. \qquad (1)$$

Механизм зарядки подвижными ионами показан на рис. 41 *б* и рис. 41 *в*.

Наиболее распространенный источник получения ионов − коронный разряд. Возможны и другие способы (например, радиоактивное излучение). Коронный разряд обычно создается между электродом в виде острия или тонкой проволоки, на которые подается высокое напряжение, и заземленным электродом. В результате частичного пробоя межэлектродного промежутка в пространстве, окружающем коронирующий электрод, ионизируются молекулы воздуха. Под влиянием электрического поля поток ионов движется от коронирующего электрода к заземленному. Знак этих ионов совпадает с полярностью коронирующего электрода.

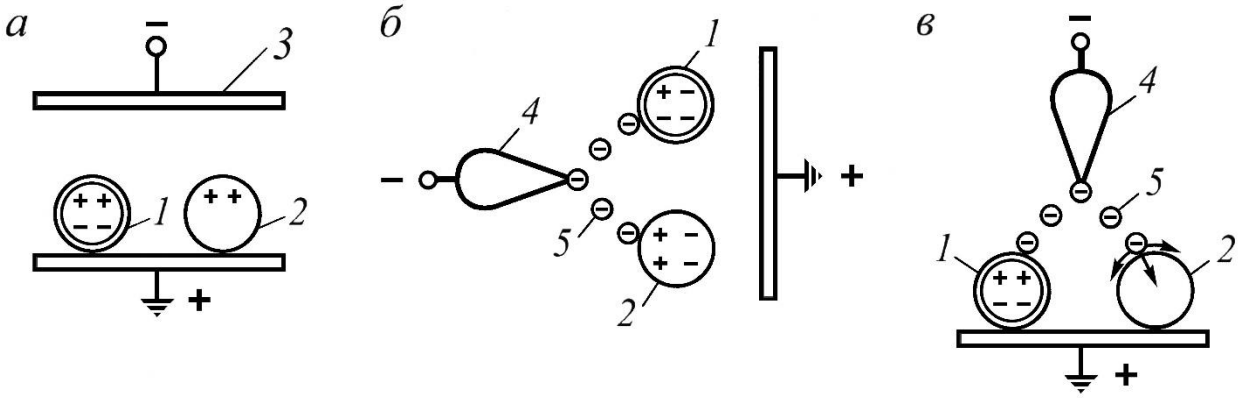


Рис. 41. Способы зарядки частиц при электрической сепарации по электропроводности:

а – соприкосновением с электродом, находящимся под определенным потенциалом; *б* – ионизацией подвижными ионами; *в* – ионизацией в сочетании с разрядкой через заземленный электрод;

1 – частица минерала-непроводника; *2* – частица минерала-проводника;

3 – электрод с большим радиусом кривизны; *4* – то же, с малым радиусом кривизны; 5 – газовые ионы.

Ток коронного разряда зависит от формы коронирующего электрода и увеличивается с увеличением напряжения, подаваемого на электроды.

В поле коронного разряда возможна зарядка как взвешенных в воздушном потоке частиц (см. рис. 41 *б),* так и находящихся на электроде (см. рис. 41 *в*). Ионы, движущиеся под действием внешнего электрического поля и поля частицы, сталкиваются с частицами и оседают на них. Поле частицы в первоначальный момент времени определяется поляризационными зарядами, по знаку противоположными ближайшим электродам. Это усиливает результирующее электрическое поле и увеличивает концентрацию ионов вблизи частиц. Через определенный промежуток времени все частицы приобретут заряд, одноименный по знаку с потенциалом коронирующего электрода, независимо от того, будут они проводниками или диэлектриками. Для взвешенных в воздухе частиц величина заряда у проводника будет

несколько выше, чем у диэлектрика вследствие большей диэлектрической проницаемости проводящих частиц.

Значительная разница в величинах зарядов проводящих и непроводящих частиц достигается при комбинации методов ионизации и разрядки через заземленный электрод (см. рис. 41 *в).* Если заряженная в поле коронного разряда частица является проводником, попадая на заземленный электрод, она легко передает свой заряд этому электроду. Скорость разрядки диэлектриков будет определяться сопротивлением частиц. Таким образом, за счет кинетики разрядки возникает разница в остаточных зарядах, пропорциональная электропроводности частиц минералов. При последнем методе зарядки обеспечивается максимальная разница в зарядах, поэтому его часто применяют в современных сепараторах, предназначенных для разделения минералов по электропроводности.

При диэлектрической сепарации зарядка частиц избыточными зарядами не производится. Внешнее электрическое поле, в котором осуществляется сепарация, взаимодействует с зарядами поляризации. На стороне частицы, обращенной к положительному электроду, возникает отрицательный заряд, и наоборот. Время установления зарядов поляризации обычно значительно меньше периода изменения внешнего электрического поля.

На противоположных концах частиц, ориентированных вдоль силовых линий электрического поля, могут образовываться свободные заряды разных знаков, происходит так называемая биполярная зарядка. Максимальные заряды при биполярной зарядке пропорциональны длине волокна и могут на несколько порядков превышать заряды поляризации; скорость установления биполярных зарядов зависит от сопротивления частиц. Биполярная зарядка имеет значение при сепарации и классификации удлиненных частиц.

Способы зарядки при трибоэлектрической сепарации:

контакт всех разделяемых минералов с электризатором, который обычно выполнен в виде вибролотка, наклонной плоскости или иного устройства,

обеспечивающего многократное соприкосновение частиц минералов с его поверхностью в процессе их перемещения (рис. 42 *а, б*);

контакт разделяемых минералов между собой при перемешивании их во вращающемся барабане или ином устройстве, обеспечивающем интенсивное соударение (рис. 42 *в*, *г*).

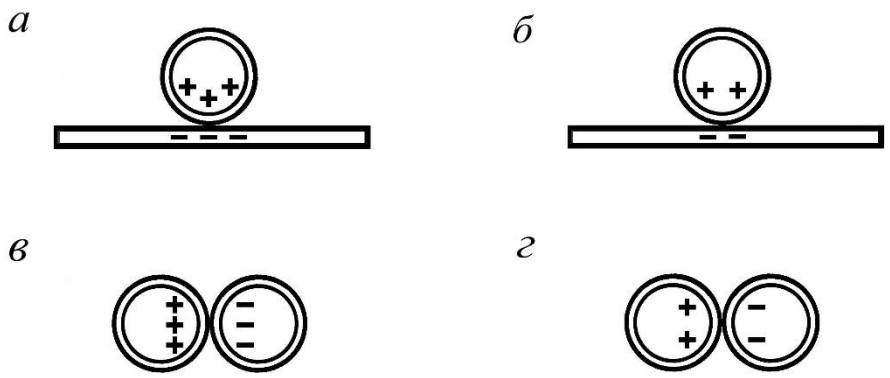


Рис. 42. Способы зарядки частиц при электрической сепарации по электропроводности:

а – контактом частиц с электродом; *б* – разрывом контакта частиц с электродом; *в* – контактом частиц друг с другом; *г* – разрывом контакта частиц друг с другом.

Первый способ контактной электризации открывает широкие возможности для селективной зарядки при подборе электризующих поверхностей, однако ввиду монослойного прохождения материала производительность этого процесса ограничена.

Второй способ, наоборот, позволяет обеспечить высокую производительность, но ограничивает возможность регулирования процесса зарядки.

В настоящее время хорошо развита теория электростатической сепарации частиц, контактирующих с осадительным электродом. Теория позволяет исследовать кинетику зарядки и разрядки частиц с учетом проводимости, диэлектрической проницаемости и формы.

Известно, что знак заряда q для частиц, лежащих на электроде, в кондукционных коронных сепараторах зависит от соотношения величин проводимостей частиц γ_1, плотности тока коронного разряда j и внешней напряженности поля E_0. Действительно, для частицы в форме полуэллипсоида, контактирующей плоскостью среза с электродом, предельный заряд

$$q = k_1 (\gamma_1 - j / E_0).$$

Постоянная времени процессов зарядки и разрядки частиц определяется выражением

$$\tau = k_2 \gamma \cdot (\gamma_1 + k_3 \cdot j / E_0),$$

где k_1, k_2, k_3 - коэффициенты, зависящие от формы частицы и электрических свойств частицы и среды.

Величины и знаки зарядов частиц и скорости их зарядки регулируются изменением значений j и E_0, зависящих от величины подаваемого на коронирующие электроды напряжения, геометрических параметров электродной системы и состава газовой среды.

С помощью тензора натяжений Максвелла определены математические выражения для электрических сил, действующих на частицы различной формы и некоторые виды сростков. Это позволило, в частности, предложить новые высокопроизводительные трубчатые сепараторы с центральным коронирующим электродом.

С учетом особенностей процесса электросепарации создание электросепараторов различной производительности было направлено главным образом для выделения металлов из вторичного сырья (отходов электро- и радио аппаратуры, кабеля и т. д.), регенерации материалов-диэлектриков (например, пластмасс) при их вторичном использовании, а также сверхчистой очистки металлических и неметаллических порошков.

Электросепарация шлаков и других отходов цветных и редких металлов осуществляется методами, использующими различную электрическую проводимость разделяемых частиц. Для этой цели применяются кондукционные сепараторы, которые позволяют зарядить разделяемые

частицы зарядами разных знаков, причем величины этих зарядов могут достигать предельно допустимых в газовой среде значений. В кондукционных электросепараторах, например, барабанных и пластинчатых, используется зависимость скорости зарядки и разрядки частиц от их проводимости. При этом частицы с большой постоянной времени разрядки удерживаются некоторое время на осадительном электроде, что позволяет организовать механическое перемещение частиц и направить разделяемые частицы по существенно различным траекториям.

Разделение смеси минералов и металлов по электропроводимости надежно осуществляется на барабанных коронных сепараторах. Совместно с институтом «Гипромашобогащение» был модернизирован и запущен в серийное производство барабанный коронный сепаратор СЭС-1000А для доводки упомянутых смесей. Сепаратор трехсекционный с длиной барабана 1000 мм и диаметром 150 мм. Особенностями этого сепаратора являются возможность перечистки промпродукта, а также электростатический электрод.

В институте разработан барабанный сепаратор 2ЭБ-32/150 с длиной барабана 1500 мм и диаметром 320 мм. Сепаратор может использоваться в цветной металлургии, промышленности строительных материалов, при переработке техногенного сырья.

Производительность сепаратора в зависимости от модификации и сырья – 3,5-7 т/ч, потребляемая мощность – 2 кВт. Набор высоковольтных электродов различной конструкции позволяет устанавливать поле коронного разряда, электростатическое поле и их комбинацию.

Технологическая секция сепараторов содержит два блока сепарации, установленных друг под другом, что позволяет осуществлять перечистку сепарируемого материала. Сепараторы снабжены электрической системой очистки осадительного электрода. Пульт управления выполнен автономным и устанавливается в удобном для обслуживания месте. Высоковольтные установки смонтированы внутри пульта управления.

Одним из источников получения цветных и редких металлов является устаревшая и бракованная электрическая и радиоэлектронная аппаратура. В такой аппаратуре содержатся золото, серебро, платина, ниобий, цирконий, молибден, медь, вольфрам, олово и другие металлы.

При переработке дробленого лома и отходов электро- и радиоаппаратуры требуется разделять материалы, имеющие контрастные и стабильные электрические свойства: проводники и непроводники. Поэтому электросепарация, позволяющая разделять материалы по их электрическим свойствам, является эффективным методом сепарации такого лома и должна занять одно из ведущих мест при извлечении из этого сырья цветных металлов. Сепарацию лома различных видов радиоэлектронной аппаратуры (радиоламп, плат различных типов, кабелей и т.п.) целесообразно проводить отдельно.

Наибольшее распространение для сепарации техногенного и вторичного сырья получили электростатические сепараторы 3ЭБ-32/50 (рис. 43), разработанные в институте. Сепараторы барабанного типа с длиной барабана 500 мм и диаметром 320 мм.

Производительность сепараторов – 0,2-0,8 т/ч. Конструкция сепараторов предусматривает трехкратную сепарацию, имеются модификации с возможностью нагрева материала и электрической очисткой барабана. Потребляемая мощность без учета нагревательных устройств – 1,5 кВт.

При сепарации измельченного лома радиоэлектронной аппаратуры, содержащего смесь частиц цветных и драгоценных металлов и изоляционных материалов, был получен концентрат с массовой долей металлов более 99,5 % при извлечении 98 %. В исходном продукте массовая доля цветных и драгоценных металлов составляла 23-70 %.

Отходы телефонного кабеля с резиновой изоляцией и медными жилами измельчались в молотковой дробилке до крупности менее 3,0 мм, в результате чего осуществлялось отделение меди от резины. В проводниковом продукте

массовая доля меди составляла 90-94 % при извлечении 90-95 %. В непроводниковом продукте массовая доля резины превышала 99,9 % при извлечении 85-90 %. Массовая доля металла в исходном продукте составляла 18-67 % и существенно не влияла на извлечение меди в проводниковый продукт и на содержание резины в непроводниковом продукте.

В результате переработки сухих отходов абразивного производства из смеси абразивов и металлического порошка выделен металлический порошок с массовой долей металла более 99,5 % при извлечении более 99 %. Металлический порошок представляет собой сплав редких и цветных металлов.

Электростатические сепараторы ЗЭБК-32/50 несколько лет эксплуатируются на заводах, изготавливающих изделия из кварцевого стекла для полупроводниковых приборов. Исходная кварцевая крупка крупностью 0,1-0,5 мм содержит весьма низкую (менее тысячных долей процента) долю рудных минералов: рутила, сфена, эпидота, слюды, роговой обманки, турмалина и др. При сепарации кроме этих минералов удаляются также аппаратурное железо и волокна из различных тканей, внесенные в крупку. После электросепарации массовая доля примесей снижается до $(0,02\text{-}0,4)\cdot10^{-3}$ % при выходе концентрата более 97 %. Достигнутая производительность составляет 200 кг/ч, потребляемая мощность – 1,5 кВт.

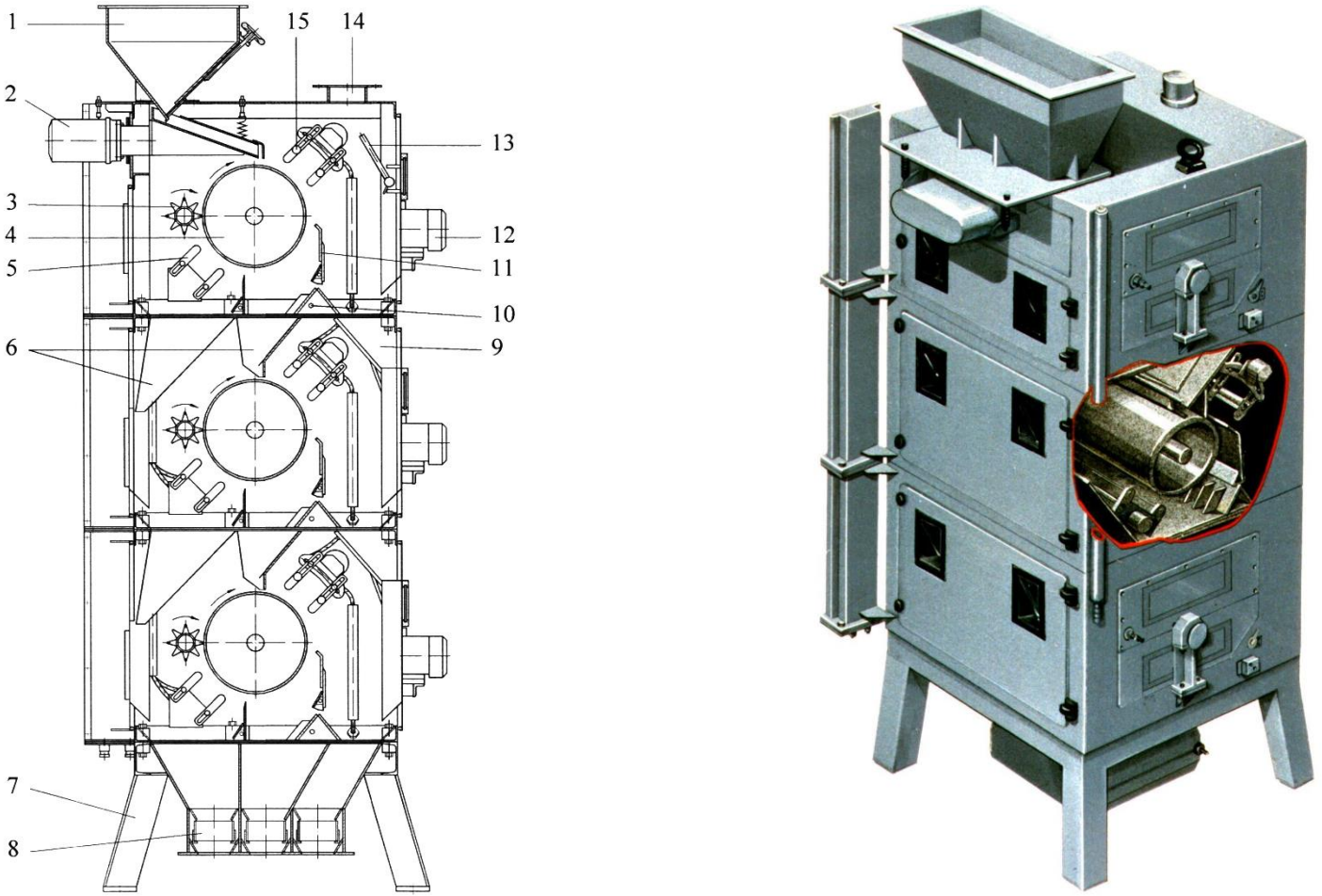


Рис. 43. Электрический барабанный сепаратор ЗЭБ-32/50:

1 – бункер, 2 – вибропитатель, 3 – щетка, 4 – барабан (осадительный электрод), 5 - электрод очистки, 6, 9 – приемники продуктов сепарации, 7 – станина, 8 – разгрузочные приемники продуктов сепарации, 10 – электронагреватель трубчатый, 11 – шибер, 12 – привод барабана, 13 – разрядник, 14 – вентиляционный патрубок, 15 – высоковольтные электроды.

Применение схемы чередующейся полярности очистки барабана в сепараторе позволило повысить эффективность процесса электросепарации, обеспечить работу в течение 5 лет практически без износа, а также решить важную задачу снятия статического электричества с частиц кварца. После электросепарации резко снизился брак кварцевого стекла, повысилось качество изделий, выплавляемых из крупки.

Переработка некоторых видов металлических порошков, в частности из жаропрочных сплавов, не может производиться в воздушной среде. Так, порошки из никелевых сплавов используются для изготовления ответственных деталей авиационных двигателей. Для предотвращения окисления поверхности таких порошков и адсорбции на их поверхности H_2O, H_2, CO переработка их осуществляется в среде инертных газов. Посторонние включения в массе металлических порошков связаны с технологией получения самого порошка. Такими включениями в основном являются частицы шлака, возгонов, окисных пленок и керамики, обычно имеющие неправильную форму. Электростатическая сепарация в данном случае обладает существенными преимуществами перед другими методами очистки, так как является надежным, стабильным и непрерывным процессом, потребляет небольшое количество энергии, газа, имеет достаточную производительность при сравнительно небольших габаритах оборудования.

Применяемые на нескольких заводах электросепараторы СЭ-32/50 и СЭС-0,3 выполнены герметичными, их конструкция допускает откачку воздуха из рабочего объема с последующим заполнением инертными газами. Выбор режимов и состава газовой смеси в электросепараторах определяется вольтамперными характеристиками тока коронного разряда. При использовании в качестве среды аргона и гелия давление в камере сепаратора составляло 0,11 МПа. Использовался аргон, очищенный в системе рециркуляции газа, и гелий из баллонов с объемными долями H_2O и O_2 соответственно 0,7 и 1,1 %. В промышленных электросепараторах использовалась отрицательная полярность коронирующих электродов, так как

ток коронного разряда при отрицательной полярности на порядок выше, чем при положительной, и более устойчив. Важной особенностью этих сепараторов является то, что среда из смеси аргона и гелия обеспечивает в 10-20 раз больший ток коронного разряда, чем воздушная среда. Это позволяет отделять от металлических порошков частицы-полупроводники (оксиды, возгоны и т.д.), то есть частицы со сравнительно высокой электропроводимостью. Из исходной массы гранул при выходе очищенного продукта 96-98 % удается выделить до 98 % посторонних неметаллических включении и снизить их содержание до 20-30 частиц на 1 кг порошка.

Накоплен большой опыт сепарации слюд, пластиков, вермикулита, отличающихся от других материалов формой и диэлектрической проницаемостью.

При этом решались задачи как очистки полевых шпатов и кварца от слюд, так и получения слюдяных, в частности вермикулитовых, концентратов. В зависимости от вида сырья и требований к качеству концентратов используются барабанные, каскадные и трубчатые электросепараторы. В барабанных сепараторах используется как чередующаяся полярность коронирующих электродов, так и резко неравномерное электростатическое поле. В электростатическом поле из исходной руды Ковдорского месторождения с массовой долей вермикулита 28,1 % получен концентрат с массовой долей вермикулита 92,2 % при извлечении 82 %.

В последние годы разработан новый трубчатый электростатический классификатор рис. 44 с центральным коронирующим электродом и отклоняющим электродом в виде вращающихся трубок. Этот аппарат позволяет извлечь 80 % слюды из массы сверхчистого кварца при потерях кварца не более 5 %. В классификаторе используются как электрические силы, так и электрический ветер, создаваемый током коронного разряда.

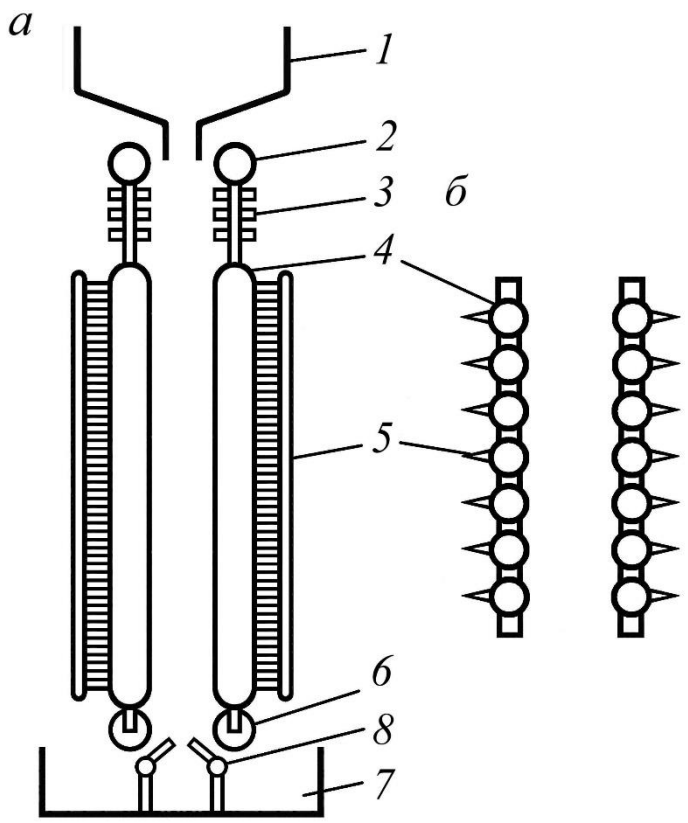


Рис. 44. Трубчатый сепаратор свободного падения:

а – вид сбоку*; б* – вид сверху*;*

1 – бункер; *2* – верхнее шарнирное крепление; *3* – привод; *4* – трубы; *5* – щетки;

6 – нижнее шарнирное крепление; *7* – приемник; *8* – шиберы.