

## ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ТОНКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

При производстве силикатных материалов на измельчение материала при подготовке сырья тратится огромная энергия:

- 10 % - дробление материалов
- 75 % - тонкое измельчение.

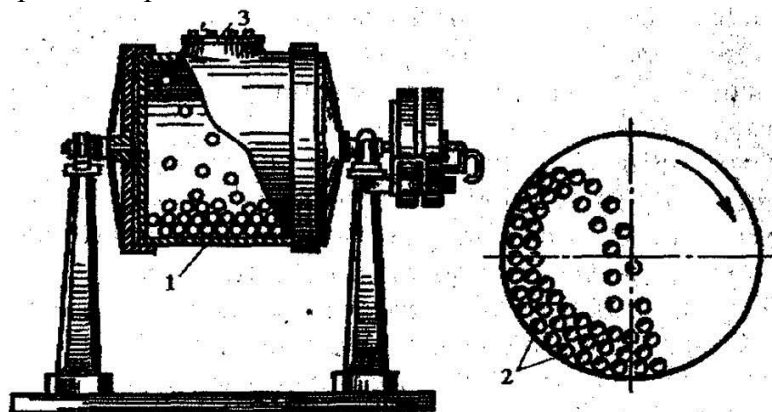
В сумме получается 85 %, а остальное затраты энергии на вспомогательные устройства.

В среднем коэффициент полезного действия мельниц составляет от 2 до 20 %.

Существуют различные конструкции мельниц как оборудования для тонкого измельчения. Однако, тонкое измельчение материалов, их смешивание и гомогенизация с силикатной промышленности осуществляется в основном в **ШАРОВЫХ МЕЛЬНИЦАХ**.

Такие мельницы могут быть различных конструкций, но принцип действия практически всегда одинаковый.

В шаровых мельницах материал находится в цилиндрическом или цилиндроконическом барабане. Внутри барабана находятся мелющие тела – шары или цилиндрические тела (цильпесы). Материал подвергается воздействию падающих мелющих тел, которые поднимаясь на определенную высоту и отрываясь от стенок барабана при свободном падении измельчают материал за счет удара и истирания.



При тонком измельчении материала большое значение придается его свойствам. Особое значение имеют такие свойства материала как:

- 1) Прочность;
- 2) Твердость
- 3) Характер кристаллической структуры
- 4) Влажность.

На таком понятии как влажность при тонком измельчении необходимо остановиться подробнее. Существует два способа помола в шаровой мельнице:

- 1) Сухой, влажность материала в мельнице не превышает 6-8 % в зависимости от вида материала – сухой порошок.
- 2) Мокрый, влажность материала в мельнице до 35-40 %. То есть материал находится в мельнице в виде суспензии - шлама или шликера с консистенцией «жидкой сметаны».

При мокром помолу материала расход энергии снижается на 30-40 %. Это происходит за счет влияния **ЭФФЕКТА РЕБИНДЕРА**, суть которого заключается в том, что вода в данной дисперсной системе выступает в роли адсорбционного понизителя прочности (твердости) материала. Она проникая в микротрещины, адсорбируется на стенках трещины и за счет дипольного характера молекулы воды происходит раздвижка трещины, а следовательно увеличение дефектности твердой частицы и снижение ее прочностных свойств.  
<https://yandex.ru/video/preview?filmId=6863998990265196937&text=%D1%8D%D1%84%D1%84>

<https://www.researchgate.net/publication/32078298560332904700128-vla1-2549&redircnt=1584764569.1>

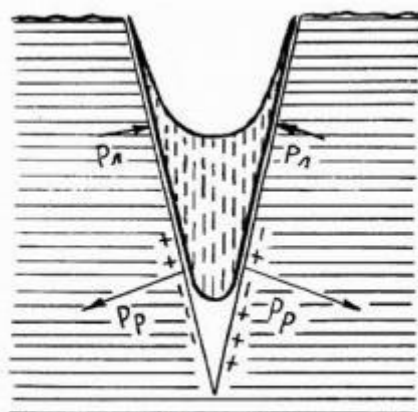
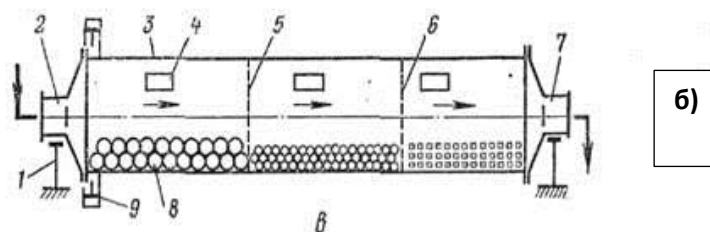
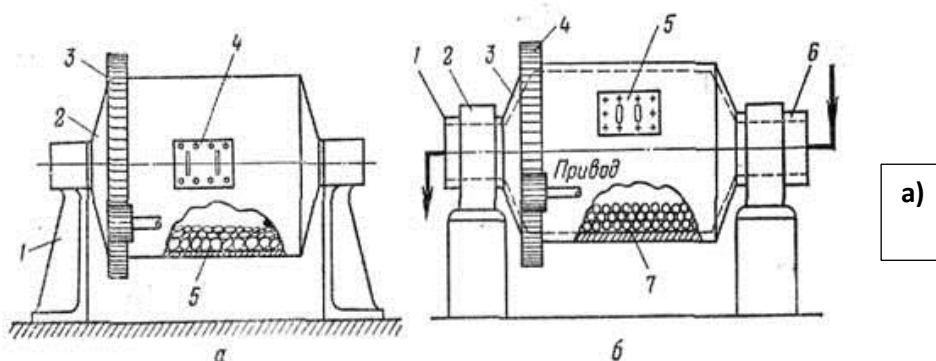


Рис.1. Эффект Ребиндера

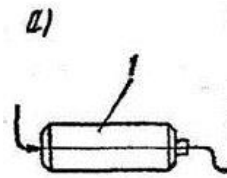
Использование поверхностно-активных веществ (ПАВ) усиливает расклинивающий эффект Ребиндера, повышая смачиваемость твердого вещества и способствуя проникновению воды в более мелкие трещины.

#### Классификация шаровых мельниц

- По принципу работы: периодического (а) и непрерывного действия (б).

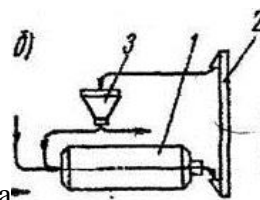


- По форме рабочего пространства:
  - цилиндрические (барabanные) – отношение длины к диаметру меньше или примерно равно 1.
  - трубные цилиндрические - отношение длины к диаметру намного больше 1
  - цилиндроконические – корпус мельницы имеет коническую часть.
- По способу помола: сухого и мокрого помола.
- По форме мелющих тел: шаровые и стержневые (в качестве мелющих используют металлические стержни с большим отношением длины к диаметру)
- По рабочему циклу:



- открытого

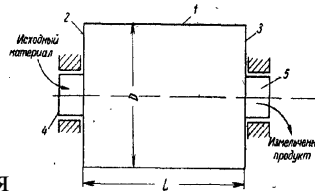
и замкнутого цикла



1- барабан мельницы; 2 – элеватор продукта помола; 3 – классификатор (ситя)

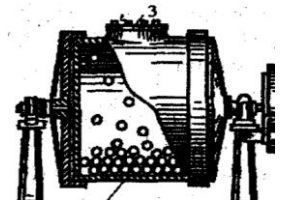
При открытом цикле работы мельницы продукт помола разгружается и уходит дальше в технологию. При замкнутом цикле – продукт помола проходит классификацию (рассев на ситах) и грубая фракция (недомол) отправляется снова в мельницу.

6. По конструктивным особенностям:



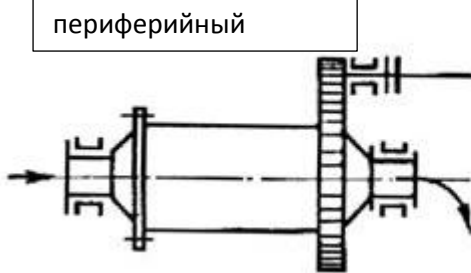
- загрузка (разгрузка) – центральная

и периферийная



- вид привода мельницы –

периферийный



центральный



Основными представителями шаровых мельниц являются шаровая барабанная мельница и трубная мельница.

### Барабанная шаровая мельница

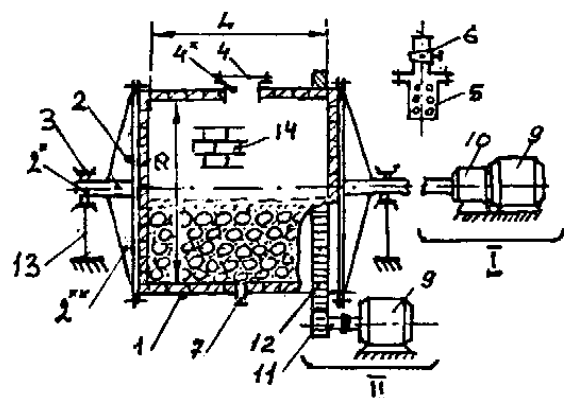
Барабанная мельница периодического действия представляет собой сварной барабан – 1. Отношение его длины к диаметру  $l/d = 1$ . Применяются такие мельницы на предприятиях тонкой керамики для тонкого измельчения и смешения (гомогенизирования) керамического шликера.

Барабан с обеих сторон закрыт чугунными или стальными днищами (крышками) – 2 с ребрами жесткости 2\*\* и цапфами 2\*. Цапфами мельница опирается на подшипники 3 и опоры 13.

Загрузка мельницы осуществляется через люк 4\* с крышкой 4. Туда же подается вода. Мельница может работать как по сухому, так и по мокрому способу, но в основном по мокрому.

Разгрузка также производится через люк 4\*, но при этом для предотвращения выпадения мелющих тел в люк вставляют стакан 5 с отверстиями для прохода шликера. Отверстие 7 служит для поступления воздуха в мельницу при разгрузке.

14 – футеровка мельницы.



Привод мельницы может быть центральным – I или периферийным – II. При периферийном приводе барабан приводится от пары шестерен - **11** и **12** от электропривода **9**.

Футеровка барабана мельницы осуществляется: кремниевыми камнями, фарфоровыми и уралитовыми брусками, закреплёнными на цементном растворе.

Барабан заполняется не более половины мелющими телами соответственно из фарфора или уралита (30 % огнеупорная глина, 62,8 % глинозем, 7,2 % доломит; температура обжига 1450 °С).

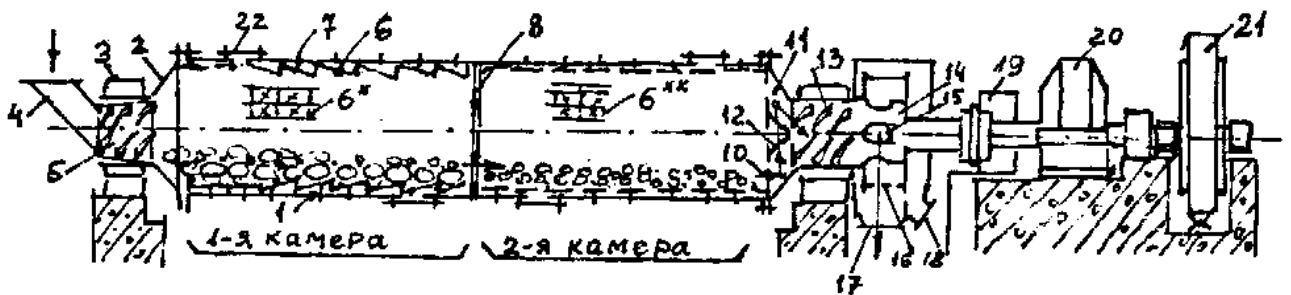
Износ за 1 час работы мельницы при помоле, например, глинозема:

- кремниевой гальки – 0,05-0,08 %
- уралитовых цилиндров – 0,025 %.

При мокром помоле в мельнице поддерживается соотношение:

Материал:шары:вода = 1: (1,2-1,8):1.

### Трубная шаровая мельница

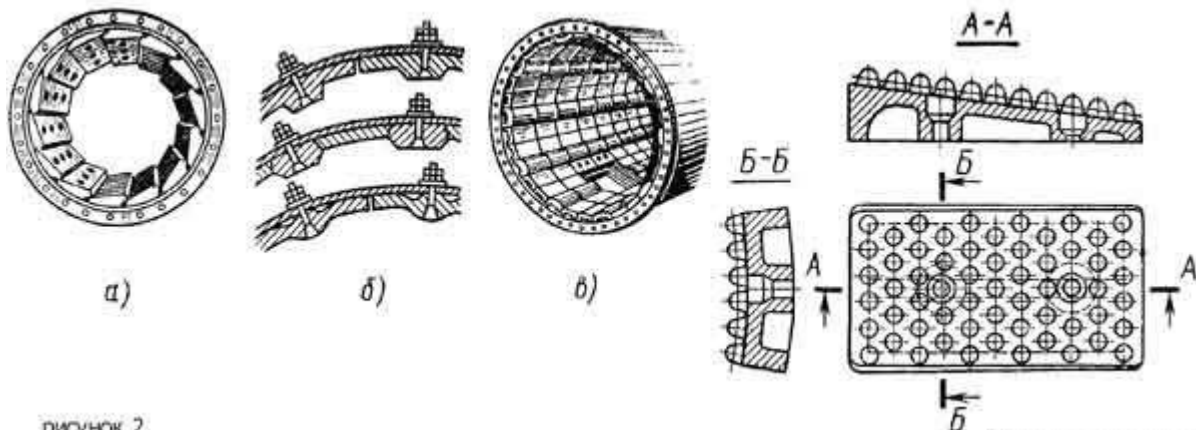


По внешнему виду они напоминают вращающуюся трубу с отношением  $l/d = 3/4 \div 6/1$ .

Корпус трубной мельницы представляет собой полый сварной цилиндр – **1**, закрытый днищами – **2**, отлитыми заодно с полыми цапфами. Цапфами мельница опирается на два подшипника – **3**. Через одну из цапф по воронке **4** непрерывно подается сырье, а через другую выходит измельченный материал. Подача и отбор материала производится с помощью трубошнеков – **5** и **13**, которые размещены в цапфах мельницы.



Внутренняя поверхность корпуса футеруется износостойкими броневыми плитами – **6**, закрепленными болтами **7**. Бронеплиты предохраняют мельницу от воздействия мелющих тел и измельчаемого материала. На поверхность барабана выходит крепление бронеплит, поэтому снаружи мельница выглядит «ощетинившейся».



Броне плиты располагаются в мельнице уступами – ступенчатая бронефутеровка – саморегулирующаяся: при работе мельницы крупный материал смещается в сторону загрузки, а мелкий в сторону межкамерной перегородки или выходной решетки. Изготавливают броне плиты из хром марганцевистой стали: 12-14 % марганец, 1 % хром.

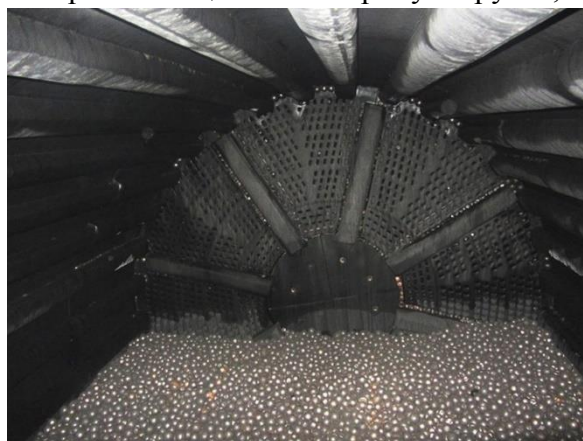
Толщина броне плит 30-60 мм.

Износ бронефутеровки примерно 0,25 кг на тонну измельчаемого материала.

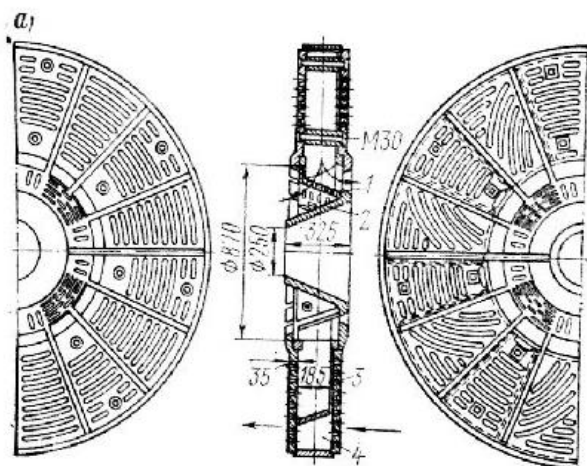
Иногда используют резиновую футеровку мельниц, что уменьшает износ в 4 раза и уровень шума значительно ниже.

Трубные мельницы бывают 1, 2 или 3-х камерные.

Для разделения камер в корпусе мельниц устанавливают сепараторные перегородки.



## Конструкция межкамерных перегородок



- 1 – сепарирующий конус;
- 2 – конус;
- 3 – стенка;
- 4 – лопасти.

Материал, проходящий через отверстия в перегородке 3, поступает на лопасти 4, которые подают его на сепарирующий конус 1. Через щели в конусе 1 проходят мелкие зерна, которые поступают на внутренний конус 2 и во вторую камеру, а более крупные куски, не прошедшие через отверстия в конусе 1, возвращаются в первую камеру.

Камеры мельницы заполняют мелющими телами. Для загрузки камер шарами, установки футеровки и ее ремонта служат люки 9 с крышками 22 (рисунок трубной мельницы).

Мелющие тела:

- шары  $d = 40-125$  мм
- цельпекс (цилиндрик):

d	25	20	18
l	40	30	27

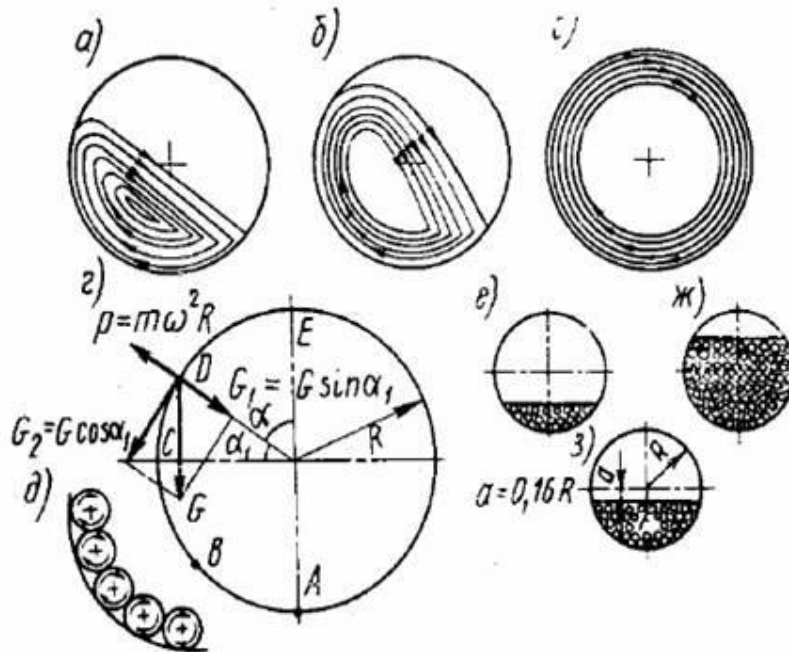
<https://youtu.be/eCvOYTkg6A>

По мере измельчения материал из первой камеры через межкамерную перегородку попадает во 2-ю камеру, где измельчается до необходимой дисперсности. (рисунок трубной мельницы). Затем материал поступает через щель торцевой решетки 10 и при помощи радиальных лопастей 11 и конуса 12 поступает в трубошnek – 13. Лопасты трубошнека транспортируют материал в патрубок 14, из которого он, просыпаясь через окна 15, попадает на сита 16. Сито

вращается вместе с мельницей. Раздробленные мелющие тела задерживаются на сите и отводятся патрубком 18, а готовый продукт через патрубок 17 направляется на складирование.

### Параметры работы мельницы

#### 1. Число оборотов мельницы.



Выделяют 3 режима работы мельницы:

- критический режим работы мельницы  $n = n_{кр}$  (рис. в) – работа измельчения не совершается, скорость вращения мельницы высокая и шаровая загрузка за счет центробежной силы прижимается к стенкам мельницы.

- водопадный режим (оптимальный)  $n = n_{опт}$  (рис. б)

- каскадный режим  $n < n_{опт}$  (рис. а) – скорость вращения барабана низкая и шары не поднимаются на определенную высоту, а скатываются по поверхности других шаров.

Рис.-г.:

$\alpha_1$  – угол подъема шара

$\alpha$  – угол отрыва шара.

- если  $\alpha_1 = 90^\circ$ , то критический режим работы при этом число оборотов барабана мельницы  $n = \frac{42.4}{\sqrt{D}}$ , об/мин

- оптимальные условия для работы мельницы по Л.Б. Левинсону создаются при угле подъема  $\alpha_1 = 35^\circ 20'$  и угле отрыва  $\alpha = 54^\circ 40'$ . Тогда  $n_{опт} = \frac{32}{\sqrt{D}}$ , об/мин – для сухого помола.

При мокром помоле число оборотов необходимо увеличивать на 10%:  $n_{опт} = 1.1 \frac{32}{\sqrt{D}}$

#### 2. Загрузка мельницы мелющими телами

$\phi$  – коэффициент загрузки.

Находится он как отношение площади загрузки ко всей площади сечения мельницы.

$\phi_{ш} = 0,25-0,35$  – загрузка шарами

$\phi_{ц} = 0,25-0,30$  – загрузка шарами.

### 3. Вес и размер мелющих тел

- вес мелющих тел. Определяется в зависимости от свойств материала и в соответствии с минимальной энергией разрушения конкретного минерального сырья.

$$q = \frac{E_0}{8 \left[ R^2 \left( \frac{n}{30} \right)^2 - 2R^4 \left( \frac{n}{30} \right)^6 + R^6 \left( \frac{n}{30} \right)^{10} \right]}, \text{ Н}$$

где  $E_0$  – минимальная энергия разрушения

$n$  – частота вращения барабана мельницы, об/мин

$R$  – радиус барабана, м.

- размер мелющих тел определяют по соотношению диаметров мелющих и размерам частиц готового продукта и исходного продукта.

Формула Олевского:  $D_{ш} = 6(lgd_k)\sqrt{d_n}$ , мм

$d_k$  – конечный размер частиц после помола, мкм

$d_n$  – размер кусков, поступающих на помол, мм

Формула Разумова:  $D_{ш} = 28\sqrt[3]{d_n}$ , мм

Причем получаем:

- если  $d_n = 100$  мм

$d_k = 100$  мкм, то по Олевскому  $D_{ш} = 120$  мм

- если  $d_n = 100$  мм, то по Разумову  $D_{ш} = 130$  мм

В общем, для каждой конструкции мельницы существует определенный свой ассортимент мелющих тел.

Износ шаров: 0,85 кг/т

Износ цилиндров: 0,75 кг/т

Через 150-200 часов работы мельницы производят догрузку мельницы мелющими телами.

Через 1800-2000 часов работы мельницы производят перезагрузку мельницы мелющими телами.

### 4. Производительность мельниц

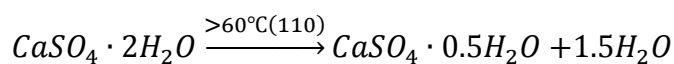
При выполнении лабораторной работы Вы познакомились с формулой расчета теоретической производительности шаровой мельницы. Но на производительность мельницы и ее эффективную работу влияют много факторов:

1) Равномерное и непрерывное питание мельницы измельчаемым материалом. Контролируется звуковыми датчиками.

2) Длина и количество камер в мельнице. Производительность 3-х камерной мельницы больше, чем 2-х камерной.

3) Водяное охлаждение мельницы.

При помоле материала в шаровой мельнице из-за трения его о футеровку мельницы и трения мелющих тел друг о друга корпус мельницы достаточно сильно нагревается, примерно до температуры порядка 150 °С. При этом температура материала достигает порядка 90 °С. Нагрев при помоле некоторых материалов, например гипса, может способствовать протеканию необратимых реакций, приводящих к снижению производительности и ухудшению качества продукции.



4) Аспирация мельниц, то есть просо наружного воздуха через мельницу. Данная операция способствует:

- удалению тонкой фракции

- удаление водяных паров

- снижение температуры материала.

- 5) Использование поверхностно-активных веществ. ПАВ – это вещества, которые снижают поверхностную энергию. В качестве таких веществ могут применяться: триэтаноламин, олеиновая кислота, каменный уголь (антистатик), гипс и другие.
- 6) Состояние шаровой загрузки мельницы.\

#### 5. Потребляемая мощность.

В шаровой мельнице мощность двигателя расходуется на подъем шаров, сообщение им кинетической энергии и на преодоление вредных примесей: потери на трение в приводе и подшипниках мельницы, тепловые потери в окружающую среду, являющиеся результатом трения между шарами, материалом и футеровкой.

Это можно записать как  $A = A_1 + A_2$

Работа, необходимая на подъем шаров по круговой траектории на среднюю высоту  $h$ :

$$A_1 = mg \cdot h, \text{ кгс} \cdot \text{м}$$

По Л.Б. Левинсону  $h = 1,13 \cdot R$ ,  $R$  – радиус мельницы, тогда

$$A_1 = 11,3 \cdot m \cdot R, \text{ Дж.}$$

Работа, затраченная на сообщение шарам кинетической энергии:

$$A_2 = \frac{mV_0^2}{2} = \frac{mn^2R_0^2}{2}$$

$V_0$  – средняя скорость движения мельницы, м/с

$n$  – число оборотов, об/с

$R_0$  – радиус инерции массы поднимающихся шаров

$$R_0 = 0,785R \quad n = \frac{22,8}{\sqrt{R}}$$

$$A = A_1 + A_2 = 11,3mR + 1,74 mR = 13,04mR$$

Мощность – это работа, совершенная во времени:

$$N = \frac{A}{t} = \frac{Ain}{2\pi};$$

$i = 1,795$  – число циклов, совершаемых шаровой загрузкой за один оборот мельницы.

$$\text{Тогда } N = 8,87m\sqrt{R}, \text{ Вт} \quad N = \frac{8,87 \cdot m\sqrt{R}}{1000 \cdot \vartheta_1 \cdot \vartheta_2}, \text{ кВт}$$

$\vartheta_1$  – КПД механизмов мельницы: центральный привод 0,9-0,94; периферийный привод – 0,8-0,88.

$\vartheta_2$  – коэффициент повышения мощности электродвигателя с учетом пускового момента.