



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ**  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**УТВЕРЖДАЮ**  
Директор ИШНПТ  
**К.К. Манабаев**

\_\_\_\_\_ « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

**ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ  
ЗАВОДОВ ТУГОПЛАВКИХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ И  
СИЛИКАТНЫХ МАТЕРИАЛОВ (ЧАСТЬ II)**

Методические указания к выполнению лабораторной и самостоятельной работы по курсу **«Основы проектирования и оборудование заводов ТНСМ»** для студентов направления подготовки **бакалавров 18.03.01 Химическая технология**

**Томск 2020**

**УДК 666.1.01**

**Основы проектирования и оборудование заводов тугоплавких неметаллических и силикатных материалов (Часть II)**

Методические указания к выполнению лабораторной и самостоятельной работы по курсу «**Основы проектирования и оборудование заводов ТНСМ**» для студентов направления подготовки **бакалавров 18.03.01 Химическая технология**

Томск: Изд. ТПУ, 2020.- 27 с.

Составители: **к.т.н. Митина Н.А.,**  
**к.т.н. Сударев Е.А.**

Методические указания рассмотрены и рекомендованы  
к изданию методическим семинаром НОЦ Н.М Кижнера  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

Руководитель НОЦ Н.М. Кижнера  
д.х.н, профессор \_\_\_\_\_ Е.А. Краснокутская

*Рецензент*

Доктор технических наук, профессор ТПУ  
*В.И. Верещагин*

© Составление ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2020  
© Митина Н.А., Сударев Е.А., составление 2020

## ВВЕДЕНИЕ

Выполнение расчетов основных аппаратов технологии ТНСМ производится студентами 4 курсов, ознакомленными с технологическими процессами, физико-химическими расчетами шихт и смесей на всех стадиях производства.

Расчеты выполняются в рамках выполнения лабораторных работ по дисциплине «Оборудование заводов и основы проектирования» направления подготовки бакалавра **18.03.01 Химическая технология** и курсового проекта по дисциплине «Оборудование заводов ТНСМ».

Перед студентами, выполняющими расчеты аппаратов в рамках лабораторных работ, ставятся задачи:

- углубление и закрепление теоретических знаний по технологии ТНСМ и оборудованию заводов путем более подробного ознакомления с конструкцией и эксплуатацией отдельных видов специального оборудования;
- овладение методикой расчета аппаратов, включая детальные знания по компоновке ходовой части аппарата, теории и технологии измельчения, анализа основных показателей работы аппарата и оптимизации его рабочих характеристик.

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗМЕЛЬЧЕНИИ МАТЕРИАЛОВ

Процесс уменьшения размеров кусков твердых материалов механическим путем – путем преодоления силы сцепления частиц – называют процессом измельчения. Обычно процесс измельчения крупных кусков называют дроблением, а процесс измельчения мелких кусков – помолом (**табл.1**).

Измельчение широко применяется в силикатной промышленности, так как использование измельченных твердых тел позволяет значительно ускорить химическое взаимодействие, обжиг, сушку и другие процессы, протекающие тем быстрее, чем больше поверхность участвующих в них твердых тел.

Процесс измельчения характеризуется степенью измельчения – отношением среднего размера куска до измельчения  $d_n$  к среднему размеру куска после измельчения  $d_k$ :

$$i = \frac{d_n}{d_k}, \text{ или } v = \frac{V_n}{V_k},$$

где  $i$  – линейная степень измельчения;

$v$  – объемная степень измельчения.

Куски исходного материала или частицы, получаемые в результате измельчения, не имеют правильной формы. Поэтому на практике размеры кусков ( $d_n$  и  $d_k$ ) характеризуются размером отверстий сит, через которые просеивают сыпучий материал до и после измельчения.

Процесс измельчения в зависимости от размеров кусков или частиц конечного продукта подразделяют на дробление и помол. Кроме этого выделяют следующие виды дробления и помола:

**Таблица 1**

**Классификация способов дробления и помола**

| Класс измельчения               | Размер кусков $d_n$ и $d_k$ , мм |                         |
|---------------------------------|----------------------------------|-------------------------|
|                                 | до измельчения $d_n$             | после измельчения $d_k$ |
| <b>Дробление:</b>               |                                  |                         |
| <i>крупное</i>                  | 1000                             | 250                     |
| <i>среднее</i>                  | 250                              | 20                      |
| <i>мелкое</i>                   | 20                               | 1-5                     |
| <i>тонкое</i>                   | 1-5                              | 0,5                     |
| <b>Помол:</b>                   |                                  |                         |
| <i>грубый</i>                   | 1-5                              | 0,1-0,04                |
| <i>средний</i>                  | 0,1-0,04                         | 0,005-0,015             |
| <i>мелкий (тонкий)</i>          | 0,1-0,04                         | 0,001-0,005             |
| <i>сверхтонкий (коллоидный)</i> | < 0,1                            | < 0,001                 |

Крупное и среднее дробление проводится, как правило, сухим способом, а тонкий и сверхтонкий помол - как сухим, так и мокрым способами (в воде или другой жидкости). При мокром способе измельчения частицы получаемого продукта имеют более равномерную величину; кроме того, при этом уменьшается пылеобразование и облегчается выгрузка готового продукта.

В существующих дробильно-помольных машинах распространенными способами измельчения материала являются: раздавливание, истирание, изгиб, удар или комбинирование перечисленных способов – раздавливание и истирание, раздавливание и изгиб, удар и истирание (**рис.1**).

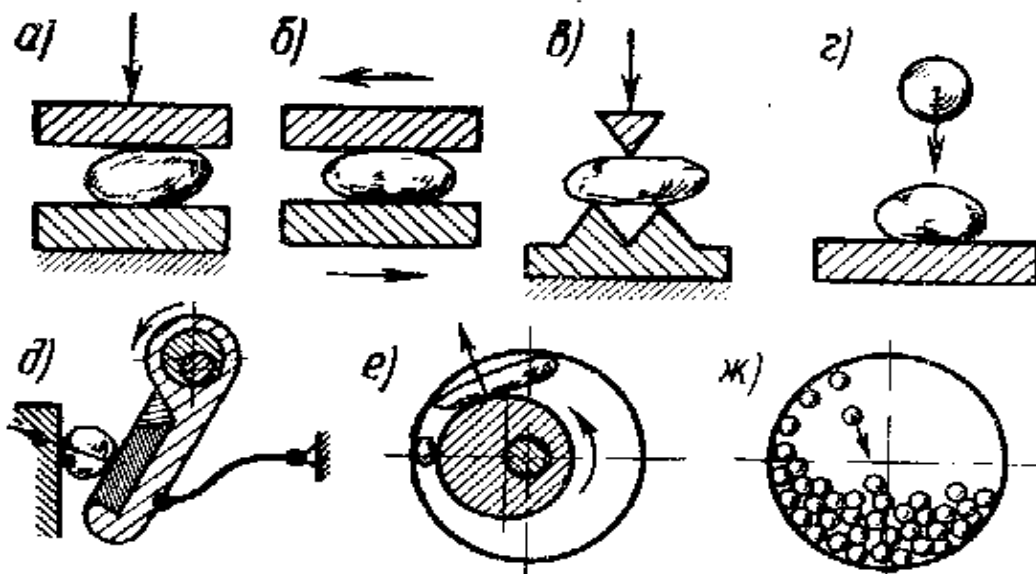
Способы измельчения выбирают в зависимости от физических свойств материала, начальной величины кусков и необходимой степени измельчения.

Основным физико-механическим свойством, определяющим выбор того или иного способа измельчения материала, является механическая прочность материала (предел прочности при сжатии и растяжении). Все материалы по прочности можно разделить на:

- *твердые материалы* прочность *более 50 МПа* (прочные известняки, гранит, базальт, серный колчедан, медные и железные руды, мрамор, кварц, фосфориты и др.);
- материалы *средней прочности* – *10-50 МПа* (сланцы, слабые известняки и песчаники и др.);
- *мягкие материалы* – *менее 10 МПа* (глина, каменный уголь, торф, комкующиеся соли).

На выбор метода измельчения большое влияние также оказывают склонность материала к комкованию, его влажность и другие свойства.

При выборе дробильно-помольных машин необходимо учитывать: эксплуатационные расходы, удельный расход энергии, степень измельчения, свойства материалов, в частности, материалы должны иметь наименьшие сопротивления возникающих в машинах усилиям в виде удара, истирания, изгиба или их комбинации. Процесс измельчения материалов является весьма сложной операцией и зависит от их однородности, плотности, вязкости, твердости, формы кусков, влажности и т.д.



**Рис.1.** Методы измельчения материалов

- а) раздавливание; б) истирание; в) разламывание (изгиб); г) удар;*  
*д) раздавливание и истирание; е) раздавливание, истирание, изгиб;*  
*ж) удар и истирание*

Отечественные ученые В.Л.Кирпичев, Л.Б. Левенсон, З.Б. Канторович, П.А. Ребиндер и другие внесли значительный вклад в создание теории и разработку конструкций дробильно-размольных машин.

## ТЕОРИИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

**Поверхностная теория** основана на гипотезе, что работ  $A_S$ , затрачиваемая на измельчение тела, пропорциональна величине вновь полученных поверхностей тел, т.е.

$$A_S = \delta_1 \cdot S, \text{ Дж}$$

где  $\delta_1$  – коэффициент пропорциональности.

Отношение работ при больших степенях измельчения –  $m$  и  $n$  может быть выражено уравнением  $A_n/A_m = n/m$ , которое показывает, что работы затрачиваемые на измельчение, прямо пропорциональны степеням измельчения или вновь образованным поверхностям. Гипотеза справедлива до определенной степени измельчения – тонкости частиц, соответствующей приблизительно ситу № 006, т.е. в пределах тонкости помола строительных материалов.

**Объемная теория** проф. В. Л. Кирпичева основана на том, что материал деформируется под действием внешних сил, вызывающих в нем напряжения. Когда напряжения в материале становятся равными пределу прочности при сжатии, материал разрушается (дробится).

По объемной теории работа, требуемая для производства аналогичных изменений в очертании геометрически подобных тел одинакового состава, изменяется пропорционально их объемам и отвечает уравнению

$$A = \delta_2 \cdot V, \text{ Дж}$$

где  $\delta_2$  – коэффициент пропорциональности.

**Обобщающая теория акад. П. А. Ребиндера** основана на том, что работа  $A$ , затраченная на разрушения тела, соответствует формуле

$$A = \delta_1 S + \delta_2 V, \text{ Дж}$$

где  $\delta_1, \delta_2$  – коэффициенты пропорциональности, Н/м и Н/м<sup>2</sup>;

$S$  – вновь образующаяся поверхность, м<sup>2</sup>;

$V$  – часть объема тела, подвергшаяся деформации, м<sup>3</sup>.

При измельчении, связанном с образованием больших поверхностей, первый член  $\delta_1 S$  уравнения значительно больше второго  $\delta_2 V$ , и работа измельчения почти пропорциональна вновь образованной поверхности. При больших размерах тела и малой величине вновь образующейся поверхности первый член уравнения значительно меньше второго  $\delta_2 V > \delta_1 S$ , и работа дробления почти пропорциональна объему дробимого тела, т.е. его деформируемой части.

Теория академика П.А. Ребиндера обобщает поверхностную и объемную теорию измельчения материалов. Существенным недостатком теории является то, что еще нет научно обоснованных способов для определения  $\delta_1$  и

$\delta_2$ , в результате чего она, как и предшествующие ей теории, имеет небольшую практическую ценность.

Рассмотренные теории не раскрывают всех весьма сложных процессов, происходящих при измельчении материала, но дают возможность рационально решать вопросы, связанные с созданием и совершенствованием дробильно-помольных машин. В соответствии с рассмотренными теориями, создаваемые дробильно-помольные машины должны быть непрерывного действия (измельченный материал из них удаляется, как только он достигает определенной степени измельчения) и работать в замкнутом цикле с сортировочными устройствами и хорошо поставленной аспирацией. В них следует подавать материал определенного объема или массы с наименьшим сопротивлением, возникающим усилиям (в виде удара, изгиба, истирания или их комбинаций), регулировать измельчающие усилия в соответствии с объемами, массами, прочностью измельчаемого материала и т. д.

## КЛАССИФИКАЦИЯ ДРОБИЛЬНО-ПОМОЛЬНЫХ МАШИН

Дробильно-помольные машины и могут быть классифицированы по следующим признакам.

**По технологическому назначению:** машины первичного измельчения, в которые материал поступает непосредственно из склада или карьера; машины вторичного измельчения, в которые поступает материал, уже прошедший первичное измельчение.

**По величине конечного продукта:** *дробилки* – машины, измельчающие материал до величины частиц более 0,5 мм; *мельницы* – машины, измельчающие материал до величины частиц менее 0,5 мм.

**По принципу действия и конструктивным особенностям:**

- *щековые дробилки* с простым и сложным движением подвижной щеки; первые измельчают материал раздавливанием и истиранием при периодическом приближении подвижной щеки к неподвижной;
- *конусные дробилки* с подвижным валом и неподвижной осью; эти дробилки измельчают материал раздавливанием и изгибом при постоянном приближении к неподвижному конусу поверхности подвижного конуса, который совершает поступательные движения в горизонтальной плоскости или круговые движения, эксцентричные относительно внутренней поверхности неподвижного конуса;

- *валковые дробилки* измельчают материал в основном раздавливанием, частично истиранием, ударом или изгибом между двумя вращающимися навстречу друг другу валками с гладкой, рифленой, ребристой или зубчатой поверхностями;
- *стругачи* измельчают материал ножами, закрепленными на вращающемся горизонтальном или вертикальном диске;
- *бегуны* измельчают материал раздавливанием и истиранием между цилиндрической поверхностью каткой и плоской поверхностью чаши;
- *дезинтеграторы* измельчают материал ударами быстро вращающихся жестко закрепленных молотков – бил;
- *молотковые дробилки* измельчают материал ударами и частично истиранием быстро вращающихся шарнирно или жестко закрепленных молотков;
- *струйные мельницы* измельчают материал в помольной камере в результате ударов летящих навстречу друг другу частиц, поступающих в нее с большой скоростью и под большим давлением;
- *кольцевые мельницы* измельчают материал раздавливанием и истиранием между криволинейными поверхностями – кольцевой дорожкой и роликами или шарами;
- *барабанные вращающиеся и вибрационные мельницы* измельчают материал ударами и истиранием свободно падающих мелющих тел, последние поднимаются во вращающемся барабане под действием центробежной силы, а в вибрационных – в результате вибрации барабана.

Материал может измельчаться мокрым (с добавлением воды) и сухим способами, в замкнутом и открытом цикле. При замкнутом цикле измельченный материал направляется в сортировочные устройства, откуда куски или частицы недостаточной тонкости возвращаются для повторного измельчения, а материал с необходимой величиной частиц используется по назначению. При открытом цикле измельченный материал направляется в машины или аппараты для дальнейшей переработки или используется как готовый продукт.

Сырьевые материалы, добавки и топливо измельчают для увеличения поверхности взаимодействия, что необходимо для обеспечения технологических процессов как в технологии силикатных и неорганических материалов, так и в любой другой технологии. Как известно, на дробление и тонкое измельчение материалов расходуется до 80% электроэнергии, потребляемой при производстве силикатных материалов. Правильный выбор схем и оборудования для дробления и помола обеспечивает уменьшение



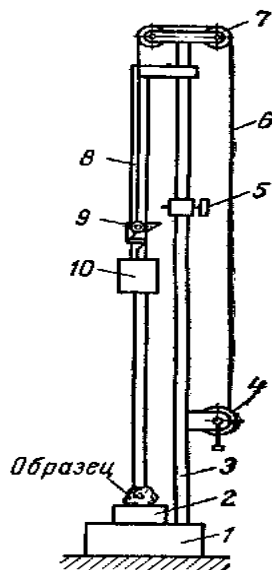
расхода электроэнергии и снижение стоимости продукции. Поэтому основной целью настоящих методических указаний является получение студентами практических навыков работы с оборудованием для измельчения материалов и закрепление теоретических знаний по курсу «Оборудование заводов ТНСМ».

Цикл лабораторных работ включает подробное изучение конструкций различных видов оборудования для измельчения материалов, овладение методикой расчета аппаратов, анализ основных показателей работы аппарата и оптимизации его рабочих характеристик.

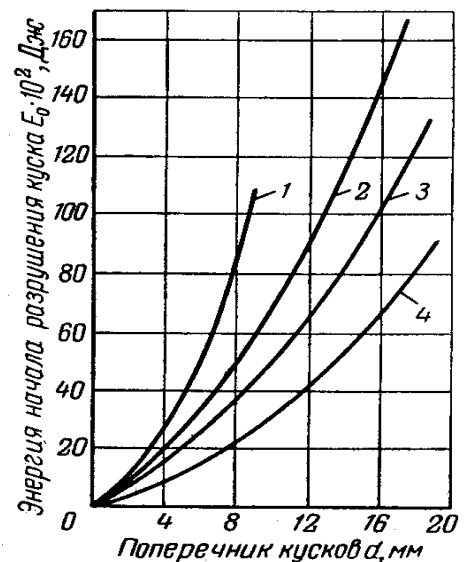
## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИНИМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

При измельчении с помощью ударной нагрузки сопротивление измельчаемого материала разрушению характеризуется *энергией начала разрушения кусков материала*. Это минимальная энергия удара груза с плоской ударной поверхностью по куску материала, которая вызывает его разрушение на несколько частей. Чтобы дробящее тело могло разрушить материал, его энергия в момент удара должна быть больше или равна энергии начала разрушения кусков:  $E_T \geq E_0$ .

Минимальная энергия начала разрушения  $E_0$  измельчаемого тела зависит от природы материала, его механических свойств и размеров. Величину этой энергии определяют опытным путем на **копере** с вертикально падающим грузом (**рис.2**).



**Рис.2** Копер с падающим грузом:  
 1 – опорная плита; 2 – наковальня;  
 3 – стойка; 4 – лебедка;  
 5 – сбрасыватель; 6 – трос;  
 7 – ролики; 8 – направляющие груза;  
 9 – защелка; 10 – груз.



**Рис.3.** График зависимости энергии начала разрушения материала от размера его частиц:  
 1 – базальт; 2 – апатитовая руда;  
 3 – фосфоритная руда;  
 4 – цементный клинкер.

Высота подъема груза фиксируется положением сбрасывателя. При подъеме груза **10** свободный рычаг защелки **9** встречает на своем пути выступ сбрасывателя **5** и отклоняется вниз. Защелка соскакивает с захвата, и груз **10** падает на наковальню **2** по направляющим **8**.

Энергия падающего груза в каждый рассматриваемый момент времени определяется по формуле:

$$E = qw^2/2g \quad (1)$$

где  $q$  – вес груза;  $w$  – скорость движения в рассматриваемый момент.

В случае свободного падения тела, когда его начальная скорость равна нулю, скорость падения в каждый рассматриваемый момент времени определяется по закону Ньютона:

$$w = \sqrt{2qh} \quad (2)$$

где  $h$  – высота падения.

Из выражения (1) и (2) имеем:

$$E = q \cdot h \quad (3)$$

Следовательно, на копре энергия падающего груза зависит от его *веса* и *высоты падения*. Вес груза в опытах остается постоянным, а высота его падения устанавливается с помощью сбрасывателя 5.

**Методика определения** минимальной энергии начала разрушения материала состоит в следующем. Отбирают несколько кусков данного материала кубообразной формы примерно одинаковой величины. Образец (кусок) помещают на наковальню, а сбрасыватель устанавливают на высоту **5 см** от поверхности образца. Если сброшенный с установленной высоты груз не разрушил образец, высоту падения постепенно увеличивают и опыт повторяют до тех пор, пока образец не разрушится, то есть пока энергия удара груза не станет меньше разрушающей. Эту энергию и принимают за минимальную разрушающую для данного размера куска материала. Так как куски материала одного и того же размера могут иметь различную прочность, результаты, полученные для испытанного образца, проверяют на других кусках того же размера. За минимальную энергию разрушения материала принимают максимальную из всех величин, полученных при проверке.

Чтобы получить график зависимости минимальной энергии начала разрушения от размера разрушаемых частиц, опыт проводят на образцах различных размеров. На **рис.3** представлены графики зависимости  $E_0$  от  $d$  для некоторых материалов.

**Выводы по работе:** сравнить энергию разрушения исследуемого материала с известными (**рис.3**).

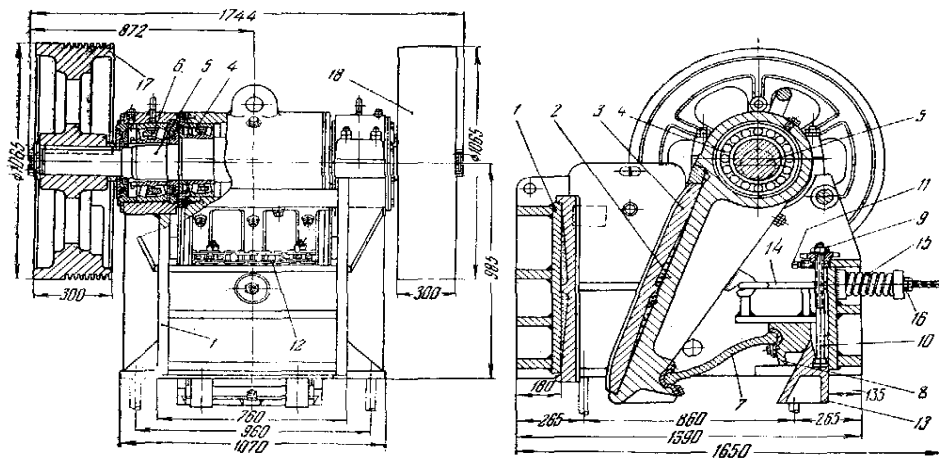
## ИЗУЧЕНИЕ УСТРОЙСТВА И РАБОТЫ ЩЕКОВОЙ ДРОБИЛКИ СО СЛОЖНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ПОДВИЖНОЙ ЩЕКИ

В промышленности строительных материалов щековые дробилки находят большое распространение для первичного (грубого) дробления материалов.

Принцип действия щековой дробилки состоит в измельчении материала раздавливанием при периодическом приближении подвижной щеки к неподвижной.

Основная классификация щековых дробилок осуществляется по характеру движения основного рабочего органа – подвижной щеки. Это дробилки с простым движением подвижной щеки и со сложным.

Лабораторная работа направлена на изучение устройства и работы щековой дробилки со сложным движением подвижной щеки (рис.4).



**Рис.4.** Щековая дробилка со сложным движением подвижной щеки

Щековая дробилка со сложным движением подвижной щеки имеет станину *1*, сваренную из стальных листов, подвижная щека *2* с рабочей ребристой плитой *3*, с радиально-сферическими подшипниками *4* насажена непосредственно на эксцентриковую часть вала *5*. Последний своими шейками смонтирован в радиально-сферических подшипниках *6*.

В дробилке роль шатуна выполняет подвижная щека *2*, и имеется только одна распорная плита *7*. Одним концом распорная плита упирается в подвижную щеку *2*, а другим – в клин *8* регулировочного устройства.

Навинченные на болты *10* звездочки *9* удерживаются от вертикального перемещения винтами *11* и охвачены цепью *12*. Последняя поворачивает звездочки и обеспечивает одинаковый (без перекосов) подъем или опускание болтов *10* вместе с клином *13*. При этом клин *8* перемещается в горизонтальной плоскости, в результате чего изменяется ширина разгрузочной щели.

Чтобы распорная *плита 7* не выпадала во время движения *щеки 2*, она оттягивается *тягой 14*, на которую надета *пружина 15*, сжимаемая *гайкой 16*. На выступающих за *подшипниками 6* концах *вала 5* закреплены *маховики 17* и *18*.

В дробилках со сложным движением точки поверхности подвижной щеки при вращении эксцентрикового вала описывают в средней части щеки замкнутые эллипсы, в верхней части – кривые, близкие к окружности, а в нижней части – дуги, близкие к прямым линиям.

**Достоинствами** щековых дробилок являются:

1. простота и надежность конструкции;
2. широкая область применения (в том числе для крупнокусковых материалов большой прочности);
3. компактность;
4. относительная простота обслуживания.

К **недостаткам** следует отнести:

1. периодический характер воздействия на материал (только при сближении щек);
2. неуравновешенность движущихся масс, которая приводит к толчкам и сотрясениям.

Поэтому дробилки устанавливают на тяжелых фундаментах и снабжают массивными маховиками.

В России щековые дробилки выпускаются согласно ГОСТ 7084-85. Основные параметры и размеры дробилок должны соответствовать ГОСТ 27412-93. В нашей стране выпуском щековых дробилок занимаются такие предприятия, как ЗАО «Автокомполит» (торговая марка «Дробмаш», г. Выкса), ОАО «Волгоцеммаш» (г. Тольятти), машиностроительная корпорация «Уралмаш» (г. Екатеринбург) и, в меньших масштабах, другие предприятия.

К числу основных расчетных параметров, характеризующих работу щековой дробилки, относятся: 1) *угол между щеками  $\alpha$* , называемый углом захвата; 2) *число оборотов вала*; 3) *производительность*.

#### 1. Параметры камеры дробления.

*Ширина* загрузочного отверстия камеры дробления ***B*** определяется по максимальному размеру кусков исходного материала  $B = D_{max} / 0,85$ .

В свою очередь, по данным эксплуатационных организаций при дроблении рядовой горной массы без предварительного отсева мелочи  $D_{max} = D_{ce} / (0,35 \div 0,45)$ . Таким образом, ширина загрузочного отверстия щековой дробилки равна:

$$B = D_{св} / (0,3 \div 0,4), \quad (1)$$

где  $D_{св}$  – средневзвешенный размер кусков исходного  $D_n$  или конечного  $d_k$  материала.

Длина загрузочного отверстия  $L$  определяется в последующих разделах расчетов из условия обеспечения заданной производительности дробилки.

Высота камеры дробления  $H$  либо определяется из формулы

$$H = (2 \div 2,5) \cdot B, \quad (2)$$

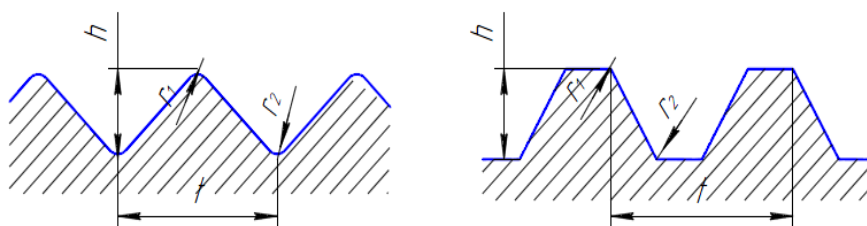
Номинальная ширина выходной щели  $b$  определяется из формулы при заданной степени дробления:

$$i = \frac{0,85 \cdot B}{b}, \quad (3)$$

где  $B$  – ширина приемного отверстия дробилки, м;

$b$  – ширина выходной щели камеры дробления дробилки, м.

Число стадий дробления назначается, исходя из требуемой степени дробления. Например, для уменьшения кусков исходного материала размером  $1200$  мм до размера  $40$  мм требуемая степень дробления будет составлять  $i = 1200/40 = 30$ . Так как большинство дробильных машин позволяют получить степень дробления от  $3$  до  $7$ , то для получения  $i = 30$  требуется как минимум  $2-3$  стадии.



**Рис. 5.** Рифления дробящих плит отечественных дробилок

Дробилки в зависимости от области применения комплектуют дробящими плитами различных конфигураций и размеров рифлений. Рифления отечественных дробилок по результатам исследований ВНИИстройдормаша приняты треугольными или трапециидальными (рис.5). Рифления трапециидальной формы применяют для предварительного дробления в дробилках с приемным отверстием шириной  $250$  и  $400$  мм. Треугольные рифления используют для предварительного дробления в дробилках с приемным отверстием шириной  $600$  мм и более. Для окончательного дробления в дробилках всех типоразмеров применяют

рифления треугольной формы [2].

Для всех плит шаг  $t$  и высоту рифлений  $h$  определяют по формуле

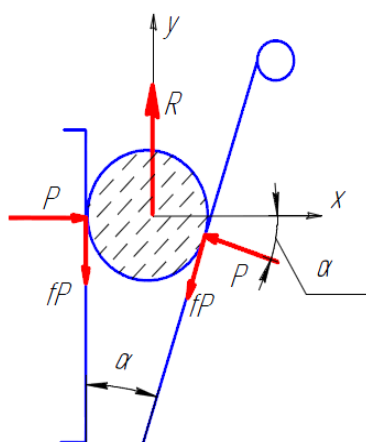
$$t = 2 \cdot h = b . \quad (4)$$

Так как ширина  $b$  выходной щели – величина переменная, то принимают ее среднее (номинальное) значение.

## 2. Угол захвата.

Угол захвата  $\alpha$  - угол между неподвижной и подвижной щеками дробилки (рис.6), который должен обеспечивать разрушение материала при сжатии, то есть захват куска, а не выталкивание его вверх. На кусок, зажатый между щеками, действуют усилие  $P$  и равнодействующая  $R$ , причем

$$R = 2 \cdot P \cdot \sin \frac{\alpha}{2} . \quad (5)$$



Силы трения  $F = f \cdot P$  действуют на кусок материала против направления выталкивающей силы, то есть, направлены вниз. При сжатии кусок материала не будет выталкиваться вверх, если силы трения будут больше или равны выталкивающей силе:

$$F = f \cdot P \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \text{ или } 2 \cdot f \cdot P \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \geq R . \quad (6)$$

Рис.6. Схема для определения угла захвата

После преобразований получаем

$$f \geq \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} . \quad (7)$$

Так как коэффициент трения  $f = \operatorname{tg} \varphi$  (где  $\varphi$  – угол внешнего трения дробимого материала по материалу дробящих плит), то

$$2 \cdot \varphi \geq \alpha \quad (8)$$

То есть нормальное дробление возможно, если угол захвата равен или меньше двойного угла трения. Согласно лабораторным исследованиям, коэффициент трения каменных материалов о сталь составляет  $0,3$ , то угол внешнего трения  $\varphi = 16^\circ$  и  $\alpha = 33^\circ$ . Угол  $33^\circ$  является предельным углом захвата, обеспечивающим процесс дробления, но по результатам опытов по увеличению производительности и, исходя из конструктивных соображений, рекомендуется выбирать угол захвата  $\alpha = 18 \dots 20^\circ$  ( $15 \dots 22^\circ$ ) [2].

### 3. Ход сжатия.

Ход сжатия в верхнем ( $S_в$ ) и нижнем ( $S_н$ ) сечениях камеры дробления (рис.7) должны обеспечивать интенсивный процесс дробления по всей высоте камеры и отвечать эффективным показателям процесса – производительности, степени дробления, расходу энергии.

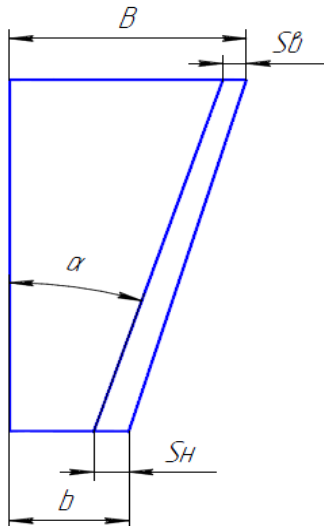


Рис.7. Схема для определения хода подвижной щеки

По результатам исследований, проведенных во ВНИИстройдормаше для дробилок с простым движением щеки:

$$S_в = (0,01 \div 0,03) \cdot B, \quad (9)$$

где  $B$  – ширина загрузочного отверстия, м.

Для дробилок со сложным движением щеки:

$$S_в = (0,03 \div 0,06) \cdot B \quad (10)$$

Ход сжатия (мм) в нижней части камеры дробления дробилки с простым движением щеки определяется по формуле [2]:

$$S_н = 8 + 0,26 \cdot b, \quad (11)$$

где  $b$  – номинальная ширина выходной щели, мм.

Для дробилок со сложным движением щеки:

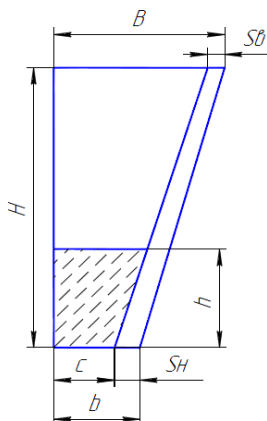
$$S_н = 7 + 0,10 \cdot b \quad (12)$$

### 4. Число оборотов вала (число двойных качаний подвижной щеки).

При отходе подвижной щеки от неподвижной из дробилки под действием собственного веса выпадает слой материала, имеющий объем призмы трапециевидального сечения, высота этого сечения

$$h = \frac{s}{\operatorname{tg} \alpha} \quad (13)$$

где  $s$  – ход щеки, то есть расстояние по горизонтали, на которое подвижная щека перемещается параллельно самой себе ( $s = s_н$ ).



Если подвижная щека делает  $n$  двойных качаний в минуту, то время отхода щеки из крайнего левого положения в крайнее правое

$$t = \frac{60}{2n} = \frac{30}{n}, \text{ сек} \quad (14)$$

Рис.8. Схема для определения частоты вращения вала



За время  $t$  призма материала в свободном падении пройдет путь

$$h = \frac{g \cdot t^2}{2} = \frac{g}{2} \left( \frac{30}{n} \right)^2 = \frac{450g}{n^2} \quad (15)$$

Число двойных качаний щеки  $n$  (*об/мин*), соответствующее наибольшей производительности дробилки равно

$$n \leq \sqrt{\frac{450g \cdot \operatorname{tg} \alpha}{s}} \approx 66,4 \sqrt{\frac{\operatorname{tg} \alpha}{s}} \quad (16)$$

ВНИИстройдормаш предложил зависимость частоты вращения  $n$  ( $\text{с}^{-1}$ ) для дробилок с простым и сложным движением щеки с шириной приемного отверстия до 600 мм включительно:

$$n = 17 \cdot b^{-0,3}, \quad (17)$$

где  $b$  – номинальная ширина выходной щели, мм.

Для дробилок с шириной приемного отверстия 900 мм и более:

$$n = 13 \cdot b^{-0,3}. \quad (18)$$

##### 5. Производительность.

Принимая  $\alpha = 22^\circ$  ( $\operatorname{tg} \alpha = 0,4$ ), теоретическую производительность  $Q_T$  в т/ч щековой дробилки можно определить по формуле:

$$Q_T = 0,15 \cdot \mu \cdot d_{cp} \cdot s \cdot b \cdot n \cdot \rho \quad (19)$$

где  $\mu$  – коэффициент разрыхления измельченного материала ( $\mu = 0,2-0,65$ , обычно 0,3).

$d_{cp}$  – средний размер кусков измельченного материала, м

$s$  – длина хода щеки, м

$b$  – длина выпускной щели, м

$n$  – число двойных качаний в 1 мин.

$\rho$  – плотность материала,  $\text{кг/м}^3$

Средний размер кусков измельченного материала

$$d_{cp} = \frac{(e+s)+e}{2} = \frac{2e+s}{2},$$

где  $e$  – минимальная ширина выпускной щели.

## 6. Определение мощности привода.

При определении мощности привода дробилок может быть использована формула Кирпичева-Кика, согласно которой работа дробления равна

$$A = \frac{\sigma_{сж}^2 \cdot V_n}{2 \cdot E}, \quad (20)$$

где  $\sigma_{сж}$  – предел прочности дробимого материала, Па;

$E$  – модуль упругости дробимого материала, Па;

$V_n$  – полный объем камеры дробления, м<sup>3</sup>,  $V_n = \pi \cdot L \cdot (D_n^2 - d_k^2) / 6$

$L$  – длина камеры дробления, м

$D_n, d_k$  – размеры исходного и получаемого материалов, м

Таблица 1.

| Материал                   | Известняк        | Диабаз           | Гранит           | Гипсовый камень  | Мрамор           |
|----------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> | 2400             | 3080             | 2700             | 2350             | 2750             |
| $E$ , МПа                  | $3,5 \cdot 10^4$ | $8,0 \cdot 10^4$ | $4,5 \cdot 10^4$ | $2,5 \cdot 10^4$ | $4,0 \cdot 10^4$ |
| $\sigma_{сж}$ , МПа        | 70               | 180              | 120              | 30               | 100              |

Данная формула не отражает точно процессы, происходящие при дроблении материала в камере, поэтому по экспериментальным данным ВНИИстройдормаша предложена следующая зависимость

$$A = \frac{K_B \cdot \Pi \cdot (\sqrt{i} - 1)}{D_{сж}}, \quad (21)$$

где  $K_B$  – коэффициент пропорциональности.

Коэффициент  $K_B$  определяется, исходя из большого числа различных факторов, и поэтому для практических расчетов формула (21) не используется [2].

Для дробилок отечественного производства мощность электропривода  $N$  [Вт] достаточно точно определяют по эмпирической формуле:

$$N = 3,9 \cdot 10^4 \cdot n \cdot S^{1,25}, \quad (22)$$

где  $S$  – площадь загрузочного отверстия, м<sup>2</sup>;

$n$  – число качаний щеки в секунду, с<sup>-1</sup>.

Кроме того для расчета мощности зачастую используют аналитическую зависимость формула Баумана:

$$N = 7,35 \cdot 10^5 \cdot s \cdot n \cdot L \cdot H / \eta, \quad \text{Вт} \quad (23)$$

где  $\eta$  – к.п.д привода,  $\eta = 0,85$ .

После определения мощности привода можно определить работу дробления (**Дж**) по формуле:

$$A = N \cdot \eta_d / n, \quad (24)$$

где  $N$  – мощность привода, **Вт**;

$n$  – частота вращения вала,  $\text{с}^{-1}$ ,

$\eta_d$  – к.п.д. дробилки ( $\eta_d = 0,5 \div 0,75$ ).

### **Цель работы:**

1. практическое ознакомление с устройством и работой щековой дробилки.
2. составление технической характеристики лабораторной щековой дробилки:
  - определить действительную и теоретическую производительность дробилки и коэффициент перехода от теоретической производительности к действительной.
  - определить фактическую степень измельчения.

### **Для работы необходимы:**

1. секундомер
2. рулетка (линейка)
3. штангенциркуль
4. технические весы и разновесы к ним.

### **Техническая характеристика дробилки:**

$L$  – длина рабочего пространства, **м**

$B$  – ширина рабочего пространства (загрузочного отверстия), **м**

$e$  – минимальная ширина разгрузочного отверстия (выпускной щели), **м**

$b$  – максимальная ширина выпускной щели, **м**

$s$  – размах щели (длина хода щели) определяется как разность значений ширины щели  $b$  и  $e$  при двух крайних положениях щеки при заданной ширине разгрузочной щели  $e$

$h$  – высота рабочего пространства, **м**

$\alpha$  – угол захвата при заданной ширине разгрузочной щели  $\text{tga} = (B-e)/h$

$n$  – число оборотов вала (**об/сек**)

## Ход работы.

Действительная производительность и степень измельчения находятся следующим образом.

1. Устанавливается разгрузочная щель дробилки на заданную величину  $e$ , берется желоб длиной около  $l$  метра и шириной равной длине загрузочного отверстия дробилки.

2. Перед дроблением навеску материала взвешивают –  $G$ , кг.

3. Для определения степени измельчения у 3-5 наибольших кусков измеряют наименьший размер –  $d_n$ , м.

4. Включают мотор и при достижении полного числа оборотов, при помощи желоба подается материал в дробилку. Замеряют время дробления навески –  $t$ , сек. Во время работы дробилки рабочее пространство ее должно быть все время заполнено.

5. Определяют насыпной вес продукта дробления –  $\rho_0$ , кг/м<sup>3</sup>. Для этого берется определенного объема металлический сосуд, наполняется до краев измельченным материалом и взвешивается.

6. Для определения степени измельчения также у 3-5 наибольших кусков измельченного материала измеряют наименьший размер –  $d_k$ , м.

Теоретическая производительность  $Q_T$  дробилки рассчитывается по формуле:

$$Q_T = \frac{(2e + s) \cdot s \cdot n \cdot \rho_0 \cdot L}{2 \operatorname{tg} \alpha}, \text{ кг/сек}$$

Действительная производительность  $Q_D$  находится по формуле:

$$Q_D = \frac{G}{t}, \text{ кг/сек}$$

Коэффициент перехода  $K$  от теоретической производительности к действительной находится по следующему выражению:

$$Q_D = K \cdot Q_T$$

Степень измельчения  $i$  определяется по формуле

$$i = \frac{d_n}{d_k}$$

Данные измерений заносятся в табл.1.

Таблица 1.

| h,<br>м | L,<br>м | B,<br>м | b,<br>м | e,<br>м | s,<br>м | n,<br>об/сек | Угол<br>захвата<br>$\alpha$ , град | G,<br>кг | t,<br>сек | $\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup> | dн,<br>м | dк,<br>м | Qд,<br>кг/с | Qт,<br>кг/с | i |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------------|------------------------------------|----------|-----------|------------------------------|----------|----------|-------------|-------------|---|
|         |         |         |         |         |         |              |                                    |          |           |                              |          |          |             |             |   |

**Выводы по работе:** оценить основные параметры работы щековой дробилки

### Лабораторная работа № 3

#### ШАРОВАЯ МЕЛЬНИЦА

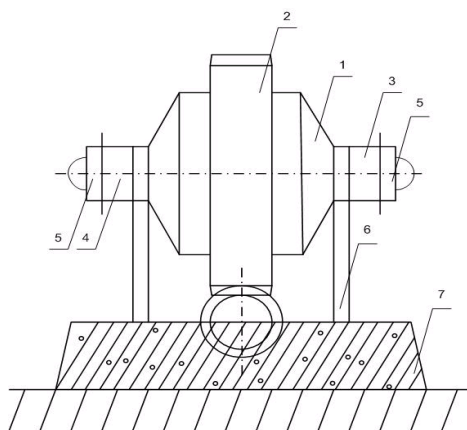
С целью интенсификации протекания твердофазовых реакций при производстве вяжущих материалов, керамики и стекла применяют тонкое измельчение материалов. Наибольшее распространение для тонкого измельчения материалов находят шаровые мельницы. Материал в них измельчается в результате ударного воздействия и частичного истирания свободно падающих тел, находящихся во вращающемся барабане вместе с измельчаемым материалом. По сравнению с другими помольными машинами шаровые мельницы обладают следующими достоинствами: простота конструкции, удобство и надежность при эксплуатации, обеспечение высокой степени измельчения, возможность автоматизации.

Из недостатков следует отметить малую скорость воздействия мелющих тел на материал, обусловленную ограниченным числом оборотов мельницы. Кроме того, в работе измельчения участвует только часть мелющих тел, а рабочее пространство барабана используется на **53-40%**. Сравнительно высок удельный расход электроэнергии и наблюдается большой износ мелющих тел и футеровки. *Коэффициент полезного действия* шаровых мельниц находится в пределах **0,005-0,015**.

**Целью работы** является практическое ознакомление с работой цилиндрической шаровой лабораторной мельницы, с ее конструкцией и определение основных параметров, характеризующих эффективность работы помольной установки. Кроме этого, в ходе работы необходимо исследовать кинетику измельчения материала в шаровой мельнице.

**Схема лабораторной цилиндрической шаровой мельницы** представлена на **рис.9**. Основной частью установки является шаровая мельница,

представляющая собой *металлический барабан 1*, имеющий цилиндрическую (в центре) и конические части. Корпус мельницы отлит заодно с полыми *цапфами 3 и 4*, причем со стороны разгрузки полая цапфа *4* оснащена решеткой, предотвращающей выпадение мелющих тел при разгрузке. На пустотелые цапфы насажены шариковые подшипники, которые с помощью *опор 6* жестко закреплены на основании. Такое крепление мельницы позволяет ей вращаться вокруг своей оси. Привод мельницы во вращение приводится с помощью электродвигателя, редуктора и зубчатой передачи. Одна из шестерен зубчатой передачи насажена на выходной вал редуктора, а другая крепится на цилиндрической части корпуса мельницы, и прикрывается *защитным кожухом 2*. Загрузка измельчаемым материалом производится через правую полую цапфу, разгрузка готового продукта осуществляется через левую полую цапфу, которые закрываются крышками. Работа лабораторной цилиндрикоконической мельницы носит периодический характер.



**Рис.9.** Схема лабораторной шаровой мельницы

### **Основные параметры работы мельницы**

#### **1. Число оборотов мельницы.**

При вращении барабана мелющие тела (шары) благодаря трению между ними и внутренней поверхностью барабана поднимаются на определенную высоту и затем, падая вниз, измельчают материал. При *медленном* вращении мельницы шары с измельчаемым материалом поднимаются вдоль стенки барабана до угла естественного откоса и скатываются вниз. Материал, находящийся между шарами, при их перекачивании будет истираться.

При *большом* числе оборотов барабана шары и материал под действием центробежных сил инерции прижимаются к внутренней поверхности

барабана, вращаются вместе с ним, не производя полезной работы. При таком вращении барабана мельницы говорят о *критическом числе оборотов*, которое определяется по формуле:

$$n = \frac{42,4}{\sqrt{D}}, \text{ об/мин} \quad (1)$$

где  $D$  – внутренний объем мельницы, м.

Для эффективной работы мельницы число оборотов должно быть оптимальным. Оптимальное число оборотов характеризуется следующим: шары и материал поднимаются на некоторую высоту и затем, падая вниз, измельчают материал. При подъеме шары движутся вместе с барабаном, в некоторой точке отрываются и падают вниз по параболической траектории. Чем больше скорость шара, тем выше его подъем и больше высота падения, а следовательно, эффективнее его удар.

*Оптимальное число оборотов* определяется по формуле

$$n = \frac{32}{\sqrt{D}}, \text{ об/мин} \quad (2)$$

## 2. Мощность привода шаровой мельницы.

В шаровой мельнице мощность двигателя расходуется на подъем шаров, сообщение им кинетической энергии и на преодоление сил сопротивления в приводе мельницы. Кроме того часть энергии превращается в тепловую в результате взаимодействия шаров, материала и футеровки мельницы.

*Мощность привода мельницы* определяется по формуле:

$$N = 0,05 \cdot G \sqrt{D}, \text{ кВт} \quad (3)$$

где  $D$  – внутренний диаметр мельницы, м;

$G$  – масса мелющих тел, кг.

*Мощность электродвигателя* подсчитывается с учетом **к.п.д.** привода мельницы:

$$N_{дв} = \frac{N}{\eta}, \text{ кВт} \quad (4)$$

где  $\eta$  – коэффициент полезного действия привода мельницы,  $\eta = 0,9$ .

### 3. Коэффициент загрузки мельницы мелющими телами.

Коэффициент загрузки мельницы мелющими телами определяется по формуле:

$$\varphi_{ш} = \frac{G}{0,785 \cdot D^2 L \cdot \rho_n}, \quad (5)$$

где  $D$  – внутренний диаметр мельницы, м;

$L$  – длина барабана мельницы, м;

$\rho_n$  – насыпная масса мелющих тел, кг/м<sup>3</sup>.

### 4. Коэффициент загрузки мельницы измельчаемым материалом.

Измельчаемый материал в мельнице располагается в пустотах между шарами. Пустотность (пористость) шаровой загрузки определяется

$$\Pi = 1 - \frac{\rho_n}{\rho_{ист}}, \quad (6)$$

где  $\rho_{ист}$  – истинная плотность материала шаров, кг/м<sup>3</sup>.

С учетом того, что уровень загружаемого материала превышает уровень шаров приблизительно на **10 %**, определяется количество материала загружаемого в мельницу:

$$P = 1,1 \cdot \Pi \cdot \varphi_{ш} \rho_n^M \cdot V, \text{ кг} \quad (7)$$

где  $\rho_n^M$  – насыпная плотность измельчаемого материала, кг/м<sup>3</sup>;

$V$  – объем мельницы, м<sup>3</sup>.

Отсюда коэффициент загрузки мельницы измельчаемым материалом составит:

$$\varphi_m = \frac{P}{V \cdot \rho_n^M} \quad (8)$$

### 5. Производительность мельницы и удельный расход электроэнергии.

Действительная производительность мельницы зависит от времени помола и от количества материала, загружаемого в мельницу:

$$B = \frac{P \cdot 60}{t}, \text{ кг/час} \quad (9)$$

где  $P$  – вес загружаемого в мельницу материала, кг, формула (7);

$t$  – общее время помола материала, мин.

Удельный расход электроэнергии определяется по формуле:

$$Q_{уд} = \frac{N \cdot 1000}{B}, \text{ кВт·ч/т} \quad (10)$$



где  $N$  – мощность, затраченная на измельчение материала, кВт·ч, формула (3);

$B$  – действительная производительность мельницы, кг/час.

Удельная производительность мельницы:

$$b = \frac{1}{Q_{уд}}, \text{ т/кВт}\cdot\text{ч} \quad (11)$$

Расчетная производительность мельницы может быть определена по формуле:

$$B_p = 6,45 \cdot V \cdot \sqrt{D} \cdot \left(\frac{G}{V}\right)^{0,8} \cdot b \cdot k \cdot k_N, \text{ кг/час} \quad (12)$$

где  $V$  – внутренний объем мельницы, м<sup>3</sup>;

$D$  – внутренний диаметр мельницы, м;

$b$  – удельная производительность мельницы, т/кВт·ч;

$k_N$  – коэффициент использования мощности  $k_N = 0,9$ ;

$k$  – поправочный коэффициент на тонкость помола. Значения  $k$  приведены в таблице 1.

Таблица 2

| Остаток на сите №008, % | 4     | 6     | 8     | 10    | 12   | 14   | 16    | 17    | 18    |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|
| $k$                     | 0,715 | 0,818 | 0,912 | 1,000 | 1,09 | 1,17 | 1,258 | 1,301 | 1,342 |

## Методика и порядок выполнения работы

### 1. Предварительная подготовка материала.

Материал для измельчения предварительно просеивается через сито с диаметром ячейки **5 мм** для удаления крупных включений.

Определяется насыпная плотность исходного материала  $\rho_n^M$ , кг/м<sup>3</sup> с помощью наклонной плоскости. Наклонная представляет собой металлический или деревянный лоток, расположенный под углом **45°** к горизонту. Под нижним обрезом лотка помещается сосуд фиксированного объема, причем расстояние между нижним обрезом наклонной плоскости и верхним краем сосуда должно быть равно **50 мм**. Материал насыпают на верхнюю часть плоскости совком, держа его на высоте **50 мм** от плоскости.

Когда сосуд наполнится материалом с некоторым избытком, последний срезают линейкой. Затем сосуд с материалом взвешивают и определяют насыпную массу материала по формуле:

$$\rho_n^m = \frac{G_2 - G_1}{V_c}, \text{ кг/м}^3 \quad (13)$$

где  $G_1$  – масса пустого сосуда, кг;

$G_2$  – масса сосуда с материалом, кг;

$V_c$  – объем сосуда, м<sup>3</sup>.

Определение насыпной массы производят *три раза* и берут среднее значение.

## 2. Параметры лабораторной цилиндроконической мельницы.

2.1. Определяем  $D$ , м - внутренний диаметр мельницы, только цилиндрической ее части, так как основной измельчающее действие происходит именно в цилиндрической части.

2.2. Определяем длину мельницы  $L$ , м.

2.3. Определяем внутренний объем мельницы  $V$ , м<sup>3</sup>, который складывается из объема цилиндрической ее и удвоенной конической:

$$V_M = V_{ц} + 2V_{ус.кон.}, \quad (14)$$

где  $V_{ц} = \pi \cdot r^2 h$  - объем цилиндрической части мельницы, м<sup>3</sup>;

$V_{ус.кон.} = \frac{h}{3} (S_1 + S_2 + \sqrt{S_1 \cdot S_2})$  - объем усеченного конуса, м<sup>3</sup>.

$S_1 = \pi \cdot r_1^2$  - площадь нижнего основания конуса, м<sup>2</sup>;

$S_2 = \pi \cdot r_2^2$  - площадь верхнего основания конуса, м<sup>2</sup>.

## 3. Шаровая загрузка.

3.1. Определяем массу мелющих тел  $G$ , кг.

3.2. Определяем насыпную плотность мелющих тел,  $\rho_n$ , кг/м<sup>3</sup>.

3.3. Определяем коэффициент загрузки мельницы мелющими телами,  $\varphi_m$ , формула (5).

4. Определяем необходимое количество материала для загрузки в мельницу,  $P$ , кг и коэффициент загрузки мельницы мелющими телами  $\varphi_m$ .

5. Определяем действительную и расчетную производительность лабораторной цилиндроконической шаровой мельницы по формулам (9-12).

6. Второй частью и немаловажной частью работы является исследование кинетики измельчения материала в цилиндрической мельнице. Для этого в течение всего установленного времени помола (*1,5-2 часа*) через определенные равные промежутки времени (*15 мин*) из мельницы производится отбор пробы материала в количестве *25-30 г*. Отобранная навеска просеивается через набор сит с размером ячеек: *2 мм, 1 мм, 0,5 мм, 0,2 мм, 0,08 мм*. По результатам отсева, то есть по процентному соотношению остатков на ситах, строят графические зависимости количества фракции материала, *n, %*, на указанных ситах от времени помола *τ, мин*:

$$n=f(\tau).$$

По результатам работы необходимо сделать следующие **выводы**:

1. После определения расчетной производительности мельницы и действительной производится анализ причин возможного несовпадения результатов.
2. Производится анализ кинетических зависимостей фракционного остатка на ситах от времени помола.

### **Литература:**

1. Основы проектирования и оборудование заводов тугоплавких неметаллических и силикатных материалов (Часть II): Методические указания / Сост. Н.А. Митина, А.А. Громов, А.Т. Добролюбов. – Томск: Изд. ТПУ, 2005 г. - 24 с.
2. Расчет щековых дробилок: Методические указания / Сост. Ю.А. Федотенко, П.В. Коротких. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2012. – 20 с.
3. Айнштейн В.Г., Захаров М.К., Носов Г.А., Захаренко В.В., Зиновкина Т.В., Таран А.Л., Костанян А.Е. Процессы и аппараты химической технологии. Общий курс. Книга 2. – М.: Издательство «Лань», 2019 – 916 с.
4. Ильевич А.П. Машины и оборудование для производства керамики и огнеупоров. – М.: Высшая школа, 1979. – 344 с.
5. Боганов А.И. Механическое оборудование цементных заводов. – М.: Машиздат, 1961. – 376 с.
6. Бауман В.А. и др. Механическое оборудование предприятий строительных материалов и изделий. – М.: Машиностроение, 1981.– 326 с.
7. Силенок В.А. Механическое оборудование предприятий стройматериалов, изделий и конструкций. – М.: Стройиздат, 1990. – 375 с.
8. Борщевский А.А., Ильин И.С. Механическое оборудование предприятий строительной индустрии. – М.: Высшая школа, 1986. – 366 с.