

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Строительные, дорожные, подъемно-транспортные
машины и оборудование»

**ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ
ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*Лабораторный практикум для студентов
специальности 1-36 11 01 «Подъемно-транспортные,
строительные, дорожные машины и оборудование»*

Часть 1



Могилев 2013

УДК 621.926
ББК 39.311-06-5
О 22

Рекомендовано к опубликованию
учебно-методическим управлением
ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет»

Одобрено кафедрой СДПТМиО «9» апреля 2012 г., протокол № 10

Составители: д-р техн. наук, проф. Л. А. Сиваченко;
ст. преподаватель А. Н. Хустенко

Рецензент канд. техн. наук, доц. О. В. Голушкова

Предназначен для выполнения лабораторных работ студентами специальности 1-36 11 01 «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование».

Учебное издание

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Часть 1

Ответственный за выпуск	И. В. Лесковец
Технический редактор	А. А. Подошевки
Компьютерная верстка	И. А. Алексеюс

Подписано в печать . Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл.-печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 99 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение
Государственное учреждение высшего профессионального образования
«Белорусско-Российский университет»
ЛИ № 02330/0548519 от 16.06.2009.
Пр. Мира, 43, 212000, Могилев.

© ГУ ВПО «Белорусско-Российский
университет», 2013



Лабораторная работа № 1. Шаровая мельница

Цель работы: изучение устройства и принципа действия барабанных мельниц с шаровой загрузкой; определение кинетики процесса помола и расчет основных параметров мельницы.

Состав и устройство макета

В производстве цемента, керамики и стекла для грубого и тонкого помола материалов широко применяются шаровые мельницы. Принцип действия шаровых мельниц основан на измельчении материала ударом и частично истиранием свободнопадающих мелющих тел во вращающемся барабане. Шаровые мельницы с периферийной разгрузкой применяются для размла шамота, извести, клинкера и сухих глин. Такие мельницы обычно изготавливаются с короткими барабанами.

Трубные мельницы в промышленности строительных материалов применяются в основном на цементных заводах.

Конструкция трубной многокамерной мельницы представляет собой пустотелый цилиндрический барабан, изготовленный из стальных листов, соединенных между собой сваркой. Внутренняя поверхность барабана облицована футеровочными броневыми плитами, отлитыми из марганцовистой стали или отбеленного чугуна. С торцов корпус закрыт литыми стальными днищами, консольные части которых выполнены в виде цапф (ими барабан опирается на подшипники, охлаждаемые водой). Удельное давление, создаваемое силами тяжести барабана и футеровкой, а также центробежными силами инерции, не должно превышать $1,6 \text{ МН/м}^2$.

Макет (рисунок 1) состоит из приводного электродвигателя 1 планетарного редуктора 2, кинематически связанного с барабаном 3 посредством муфты 4. Крутящий момент передается на цапфы барабана, которые опираются на подшипниковые опоры 5 и 6, связанные общей рамой с приводом.

С помощью пускового устройства 7 приводной электродвигатель 1 приводит во вращение барабан 3 через муфту 4 и редуктор 2 с понижением частоты вращения.

Мелющая загрузка в виде шаров или цильпесса 8 вместе с измельчаемым материалом загружается вовнутрь барабана и выгружается из него через люк с фиксатором 9. Объем загрузки барабана составляет 28–34 % от общего внутреннего объема последнего.

Измельчение происходит в основном за счет удара и истирания частиц материала шаровой загрузкой. Чем тоньше помол материала, тем больше должен преобладать эффект истирания в рабочем объеме.



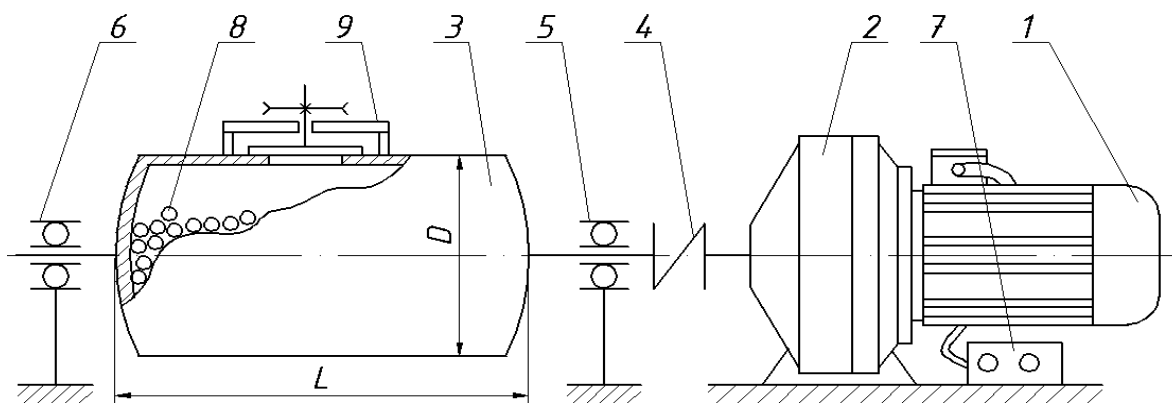


Рисунок 1 – Схема шаровой мельницы

Теоретические положения и пример расчета мельницы

Частота вращения барабана n , с^{-1} , определяется по формуле

$$n = 2 \cdot (5 \cdot \varphi + 2) / 15 \cdot \sqrt{D_0}, \quad (1)$$

где φ – коэффициент заполнения мельницы шарами, $\varphi = 0,28–0,34$;
 D_0 – внутренний диаметр барабана, м.

Для расчета производительности определяется объем камеры измельчения V , м^3 , по следующей формуле:

$$V = \pi \cdot D_0^2 \cdot L_0 / 4, \quad (2)$$

где L_0 – внутренняя длина барабана, м.

Масса мелющих тел $m_{\text{Ш}}$, т, рассчитывается по формуле

$$m_{\text{Ш}} = \varphi \cdot \mu \cdot \rho_{\text{МЕТ}} \cdot V, \quad (3)$$

где μ – коэффициент пустотности загрузки, $\mu = 0,5–0,6$;
 $\rho_{\text{МЕТ}}$ – плотность мелющих тел, $\rho_{\text{МЕТ}} = 7,8 \text{ т/м}^3$.

Производительность Q_p , т/ч, определяется по формуле

$$Q_p = 6,45 \cdot V \cdot \sqrt{D_0} \cdot \left(\frac{m_{\text{Ш}}}{V}\right)^{0,8} \cdot q \cdot K, \quad (4)$$

где q – удельная производительность мельницы на 1 кВт полезной мощности (может рассчитываться как отношение $m_{\text{Г.П}}/t$), для цементного клинкера и кварца обычно $q = 0,03–0,06 \text{ т/ч}$;

K – коэффициент тонины помола, зависящий от остатка на сите № 008 (таблица 1).

Мощность двигателя привода барабанной мельницы P , кВт, с учетом массы измельчаемого материала (принимается обычно $m_M = 0,14 m_{III}$):

$$P = 0,45 \cdot \pi \cdot g \cdot D_0 \cdot m_M \cdot n / \eta_{II}, \quad (5)$$

где η_{II} – КПД привода.

Таблица 1 – Исходные данные

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Тонина помола $A_{008}, \%$	5	7	9	11	13	15	17	19	20	7	8	10
K	0,77	0,86	0,91	1,04	1,13	1,21	1,29	1,37	1,42	0,86	0,89	1,01

Используемое оборудование, приборы и материалы

Макет мельницы предназначен для демонстрации принципа измельчения в шаровых барабанных мельницах с шаровой загрузкой. Отсутствие защитной футеровки внутримельничного пространства несколько искажает картину «водопадного» способа движения загрузки и дает повышенное содержание железа в пробе измельченного материала, однако позволяет помочь понять принцип происходящего процесса помола и расчета основных параметров шаровых мельниц. Загрузка шаров и материала производится через загрузочный люк. Отбор проб для изучения кинетики измельчения осуществляется через некоторые равные промежутки времени. Масса пробы из-за малости объема измельчаемого материала не должна превышать 50 г.

Крупность загружаемого материала к диаметру шара не должна превышать соотношения $D_M/D_{ш} = 0,1$.

Мощность, потребляемая электродвигателем, фиксируется общим ваттметром П-501. При измерении мощности предел измерений ваттметра должен подбираться таким, чтобы использовалось не менее 2/3 шкалы прибора.

В связи с тем, что однофазный прибор используется для измерения мощности в трехфазной сети, его показания необходимо умножить на поправочный коэффициент $\sqrt{3} = 0,73$.

Отсюда значение экспериментально определенной мощности вычисляется по формуле

$$N_э = z \cdot n \cdot \sqrt{3}, \quad (6)$$

где z – цена деления шкалы на данном режиме, $z = V_{II} \cdot A_{II} / n_m$;

- n_m – число делений на шкале прибора;
 V_{II} – предел измерений по напряжению, В;
 A_{II} – предел измерения по току, А;
 n – число делений показания.

Порядок выполнения работы

После тщательного изучения теоретических положений данной лабораторной работы, получения задания от преподавателя (см. таблицу 1) и выполнения расчетов основных параметров мельницы необходимо выполнить экспериментальную часть работы в следующей последовательности:

- загрузить барабан мельницы на расчетную степень заполнения камеры измельчения m_{III} ;
- загрузить измельчаемый материал с учетом максимальной исходной крупности $m_{III} = 1-2$ кг;
- загерметизировать люк загрузки и произвести измельчение с контролем потребляемой мощности и остатка на сите с помощью П-501, РП-5;
- определить массу готового материала за время измельчения t_i ;
- определить энергоемкость процесса помола q , Вт·ч/кг;
- данные экспериментов занести в таблицу 2.

Таблица 2 – Результаты экспериментальных исследований

Опыт	t , с	P , Вт	A_{008} , %	m_M , кг	$m_{Г.П}$, кг	q , Вт·ч/кг
1	60					
2	120					
3	180					
4	240					
5	300					

Содержание отчета

В отчете приводятся данные, полученные путем теоретического расчета основных параметров и полученные экспериментальным путём. Табличные значения экспериментальных и теоретических исследований приводятся с последующими выводами по работе. Делается заключение о схожести полученных результатов.

Отчет должен содержать схему макета мельницы, таблицу и график экспериментальных исследований, теоретические расчеты и др.

Контрольные вопросы

- 1 Как классифицируются шаровые мельницы?
- 2 Устройство и принцип действия макета.

- 3 Предложение по повышению производительности мельницы.
- 4 Как снизить энергоемкость процесса помола цементного клинкера?
- 5 Какие параметры влияют на величину потребляемой мощности двигателем мельницы?

Лабораторная работа № 2. Изучение конструкций и определение основных параметров грохотов

Цель работы: изучение конструкций вибрационных грохотов; определение их основных параметров и экспериментальное исследование рабочих процессов.

Оборудование, приборы и инструменты: грохот вибрационный, грохот пружинный, набор сит лабораторных, весы аналитические, угломер, линейка, секундомер, ваттметр.

Общие сведения

Грохочение представляет собой процесс разделения кусковых материалов по крупности и подразделяется на следующие виды: предварительное, когда из общей массы материала выделяются куски, не требующие дробления в машинах первой стадии дробления, или куски негабаритных размеров; промежуточное, когда выделяется продукт, не требующий дробления, в последующей стадии дробления выделяются частицы крупнее заданных размеров, которые вновь возвращаются на повторное дробление; окончательное, когда готовый продукт дробления разделяется на части заданной крупности.

Грохочение может быть сухим и мокрым. В последнем случае исходный материал поступает на грохот в виде пульпы или в сухом виде, и на грохоте орошается водой из специальных брызгальных устройств. При мокром грохочении происходит не только разделение материала по крупности, но и промывка его, очищающая материал от вредных примесей (глины, ила и т. д.).

Машины, применяемые для грохочения материалов, – грохоты – подразделяются на валковые, дуговые, барабанные, качающиеся и вибрационные. Наиболее распространены вибрационные грохоты.

По *траектории колебаний рабочих органов* (коробов) делятся на:

- грохоты с циркуляционными колебаниями, круговыми или эллиптическими (наклонные грохоты) (рисунок 1, а, б);
- грохоты с направленными колебаниями (горизонтальные грохоты) (рисунок 1, в, г).

По *способу возбуждения колебаний* делятся на:

- грохоты с силовым (центробежным) возбуждением (см. рисунок 1, а, в);

– грохоты с кинематическим возбуждением (эксцентрикковые грохоты) (см. рисунок 1, в, г).

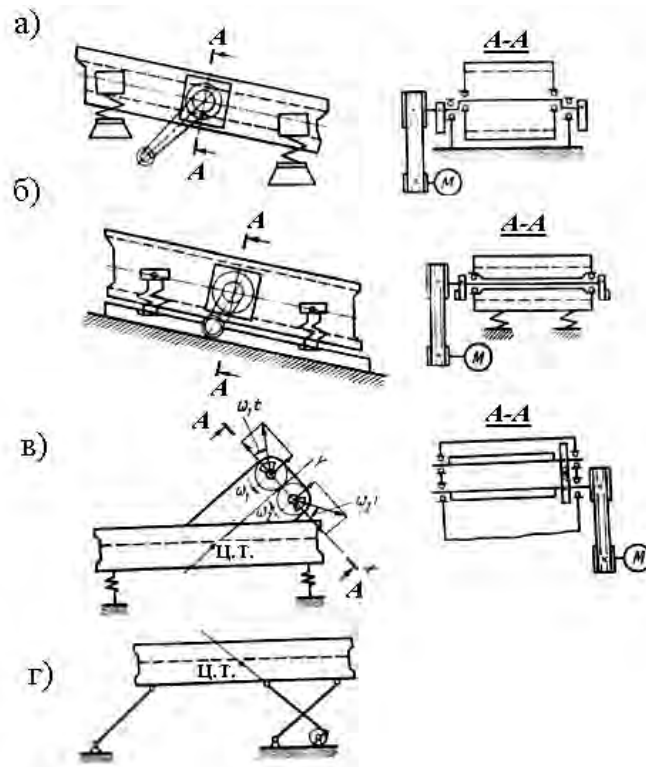


Рисунок 1 – Схемы грохотов

По *характеру настройки* делятся на:

- грохоты зарезонансные;
- грохоты резонансные.

По *числу колеблющихся масс* делятся на:

- грохоты одномассные;
- грохоты многомассные.

По *числу сит* делятся на:

- односитные грохоты;
- многоситные грохоты.

Наибольшее распространение из-за простоты конструкции получили одномассные грохоты с зарезонансной настройкой (см. рисунок 1, а, в).

Одной из новых конструкций грохотов для тонкого грохочения строительных материалов является пружинный грохот, схема которого приведена на рисунке 2.

В качестве просеивающих поверхностей обычно используются решета и проволочные сита, которые по форме исполнения могут быть барабанными, плоскими, криволинейными. Эффективность их работы оценивается показателем, который называется эффективностью грохочения.

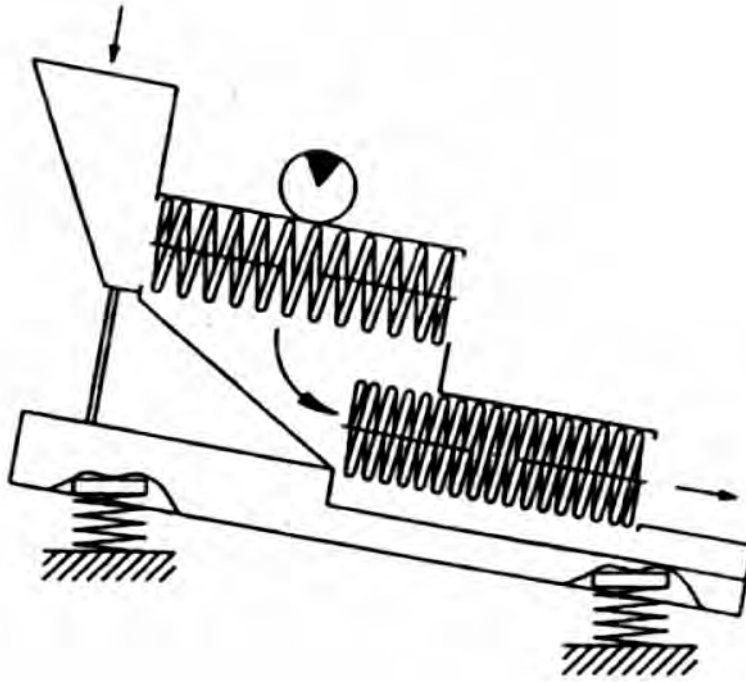


Рисунок 2 – Пример конструкции аппарата с двумя просеивающимися секциями и инерционным приводом

Под эффективностью классификации (грохочения) вообще понимают отношение массы материала, прошедшего через сито-решето (подрешетного продукта), к массе материала данной крупности, содержащегося в исходном продукте.

$$E = (m'_a / m_a) \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где m'_a и m_a – количество материалов заданной крупности, прошедшего через сито и в исходном продукте, соответственно.

Эффективность грохочения зависит от большого количества факторов и составляет 35–98 %.

На практике эффективность грохочения для вибрационных грохотов определяется на основе эмпирических зависимостей с учётом эталонного значения эффективности грохочения. Для производительности, не превышающей расчетную, она принимается постоянной (в процентах):

$$E = e \cdot k'_1 \cdot k'_2 \cdot k'_3, \quad (2)$$

где e – эталонное значение эффективности грохочения (при средних условиях), равное для виброгрохотов горизонтальных и наклонных соответственно: для щебня – 0,89 и 0,86 %, для гравия – 0,91 и 0,87 %;

k'_1 – коэффициент, учитывающий угол наклона грохота (для наклонных грохотов) (таблица 1);

k'_2 – коэффициент, учитывающий содержание нижнего класса (C_H , %) в исходном материале (таблица 2);

k'_3 – коэффициент, учитывающий содержание нижнего класса зерен меньше половины отверстия сита ($C_{0,5H}$, %) в исходном материале (см. таблицу 2).

Таблица 1 – Значения коэффициента k'_1

$\alpha, ^\circ$	12	15	18	21	24
k'_1	1,03	1,02	1,00	0,96	0,88

Таблица 2 – Значения коэффициентов k'_2 и k'_3

$C_H, C_{0,5H}, \%$	20	30	40	50	60	70	80
k'_2	0,86	0,9	0,94	0,97	1,00	1,015	1,02
k'_3	0,9	0,94	0,98	1,00	1,01	1,02	1,03

Производительность виброгрохотов. Производительность виброгрохотов Q_T , м³/ч, определяют по формуле

$$Q_T = K \cdot S \cdot q \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3, \quad (3)$$

где K – коэффициент, зависящий от вида сортируемого материала;

S – площадь сита, м²;

q – удельная производительность 1 м² сита, зависящая от размера ячеек, м³/(м²·ч);

k_1 – коэффициент, учитывающий мокрый способ грохочения;

k_2 – коэффициент, зависящий от содержания зерен нижнего сорта в исходном материале;

k_3 – коэффициент, зависящий от содержания в нижнем сорте зерен, размер которых меньше 1/2 размера ячейки сита.

Материал, способ грохочения и коэффициенты q , k_1 , k_2 , k_3 берутся из таблицы 3.

Таблица 3 – Значения коэффициентов q , k_1 , k_2 , k_3 и варианты

Параметры	Размерность	Значение									
		3									
d	мм	3	5	7,5	10	20	30	40	60	80	100
q	м ³ /(м ² ·ч)	2,5	4	6	10	21	28	36	48	60	83
k_1	–	3,4	3	2,6	2,1	1,5	1,1	1	1	1	1
Содержание зерен нижнего сорта в материале	%	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95

Окончание таблицы 3

1	2	3									
k_2	–	0,58	0,66	0,76	0,84	0,92	1	1,08	1,17	1,25	1,27
Содержание в нижнем классе зерен 1/2 ячейки	%	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95
k_3	–	0,63	0,72	0,82	0,91	1,0	1,09	1,6	1,26	1,37	1,4
Материал	–	Гравий К = 1					Щебень К = 0,8				
Способ грохочения	–	М	С	М	С	М	С	М	С	М	С
Варианты	–	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Примечание – М – мокрый; С – сухой способ грохочения											

Мощность виброгрохотов. Мощность $P_{ДВ}$, кВт, необходимая для работы вибрационного грохота, определяется как

$$P_{ДВ} = 4 \cdot \pi^3 \cdot n^3 \cdot m_{Д} \cdot r_{Д} \cdot d_{В} \cdot f / \eta, \quad (4)$$

где f – приведенный коэффициент трения вала подшипников (для подшипников скольжения $f = 0,6–0,1$; для шарикоподшипников $f = 0,001–0,004$; для роликоподшипников $f = 0,0025–0,01$);

$m_{Д}$ – масса дебаланса грузов, т;

n – частота эксцентрикового вала, c^{-1} ;

$r_{Д}$ – расстояние от оси вращения вала до центра тяжести дебаланса, м;

$d_{В}$ – диаметр цапфы вала под подшипник (см. тип подшипника), м;

η – КПД привода, $\eta = 0,8–0,9$.

Значения параметров вибрационного грохота берутся из инструкции по эксплуатации.

Производительность пружинного грохота. Производительность Π , т/ч, пружинного грохота можно определить по формуле

$$\Pi = 3600 \cdot F \cdot v \cdot g \cdot k_p \cdot k_{усл}, \quad (5)$$

где F – площадь живого сечения просеивающей поверхности;

v – скорость прохождения материала через просеивающую поверхность;

g – плотность материала;

k_p – коэффициент разрыхления материала, $k_p = 0,2–0,3$;

$k_{усл}$ – коэффициент, учитывающий условия работы, $k_{усл} = 0,6–0,7$.

Мощность пружинного грохота. Мощность двигателя привода пружинного грохота можно определить по формуле

$$N_{\text{дв}} = N_{\text{тр}} + N_{\text{зр}}, \quad (6)$$

где $N_{\text{тр}}$ – мощность, затрачиваемая на преодоление трения в подшипниковых опорах и узлах сопряжения;

$N_{\text{зр}}$ – мощность, затрачиваемая на транспортирование материала по просеивающей поверхности и прохождение между ее элементами.

Мощность на привод пружинного грохота наиболее целесообразно определить экспериментально.

Порядок выполнения работы

После изучения теоретической части, конструкции грохотов студенты получают задание на проведение экспериментов и производят подготовку исходных материалов.

После подготовки установки к работе производят ее пробный пуск. Далее осуществляют экспериментальные исследования на пружинном грохоте. Показания снимаются при изменении расхода материала, крупности исходного продукта, влажности, зазора между витками рабочего органа, угла его наклона к горизонту и длины зоны просеивания.

По результатам исследований строятся графические зависимости технологических и энергетических показателей грохочения от геометрических параметров рабочего органа и свойств перерабатываемого материала. Информацию о процессах грохочения, конструкции грохотов и полученные результаты студенты заносят в отчет, который оформляется каждым студентом и защищается индивидуально.

Контрольные вопросы

- 1 Что такое эффективность грохочения и как она определяется?
- 2 Как влияет влажность и крупность исходного материала на эффективность грохочения и производительность грохотов?
- 3 Назовите основные направления интенсификации процессов грохочения.
- 4 Как влияют амплитуда и частота колебаний просеивающей поверхности на закономерность грохочения?
- 5 Напишите формулу для определения производительности грохота.
- 6 Как определить теоретическую и экспериментальную производительность виброгрохота?
- 7 На что расходуется мощность при грохочении?
- 8 В чем различие k для гравия и щебня?



Лабораторная работа № 3. Исследование работы и определение основных параметров установки для дробления и сушки влажных материалов

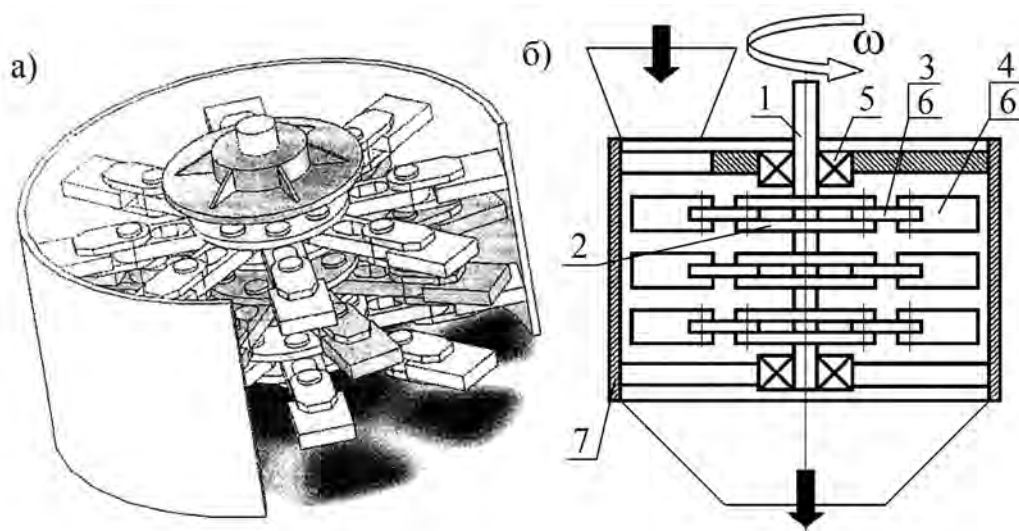
Цель работы: изучение конструкции дробильной установки для измельчения и сушки влажных материалов, исследование рабочих процессов и определение основных параметров этого оборудования.

Применяемое оборудование и средства контроля: дробилка ударного действия Д-400, измерительный комплект К-50, расходные емкости, сушильный шкаф, весы, тахометр, линейка.

Описание конструкции дробилки Д-400. Типовое конструктивное исполнение двухпорных молотковых дробилок ударного действия с вертикальным расположением ротора представлено на рисунке 1.

Количество ярусов бил и количество бил на ярусе принимаются с учетом опыта эксплуатации дробилок и проведенных лабораторных испытаний.

Несмотря на конструктивную простоту, в камере дробилки ударного действия протекают довольно сложные процессы. Одновременно осуществляется дробление материала и движение его вниз до места выгрузки.



а – аксонометрическая модель; б – плоская; 1 – вал; 2 – диск; 3 – серьга; 4 – било; 5 – подшипниковая опора; 6 – подвижные шарниры (пальцы); 7 – цилиндрический корпус; стрелками показана загрузка (сверху) и разгрузка (снизу) материала

Рисунок 1 – Принципиальная конструкция молотковой дробилки с вертикальным ротором

Скорость и направление частиц материала зависят от многих факторов – формы и размера частиц, физико-механических свойств материала, положения частицы относительно ударного элемента в момент удара и др.

При неправильной форме частиц их коэффициент восстановления значительно отличается от коэффициента восстановления для частиц правильной шарообразной формы при одинаковых физических свойствах материала, что приводит к значительному разбросу углов отражения частиц от ударных элементов и стенок рабочей камеры дробильной установки. Существенное влияние оказывает на характер движения частиц материала в камере дробилки износ рабочих ударных элементов. На результаты дробления оказывает влияние влажность исходного материала и дисперсный состав питания.

Таким образом, спектр случайных воздействий при дроблении материала в камере дробилки весьма обширен. В связи с этим точный инженерный расчет такого аппарата затруднен.

Теоретическая часть

Определение геометрических параметров дробилки. Учитывая опыт работы дробильных установок ударного действия с различными материалами, рекомендации исследований ведущих фирм-производителей, из всего многообразия эксплуатируемых установок, имеющих лучшие технико-экономические показатели, можно отметить следующие.

Анализ параметров дробильных установок показывает, что наиболее целесообразно принимать следующие основные конструктивные параметры:

- отношение диаметра камеры дробления дробилки к ее высоте

$$\frac{D}{H} = 0,6-0,8;$$

- отношение диаметра ротора к диаметру камеры дробления

$$\frac{D_{рот}}{D} \approx 0,1-0,15;$$

- расстояние между соседними ярусами рабочих элементов

$$l_{яр} = 0,05-0,2;$$

- число рабочих элементов на каждом ярусе – четное, $n_{яр} = 4, 6, 8$; для диаметров камер 400, 700, 1000 мм.

Производительность дробилки. На производительность дробилки существенно влияют условия подачи исходного материала и его крупность. Наибольшая производительность достигается при такой загрузке, когда в зону работы ударных элементов постоянно в определенном коли-

честве подается исходный материал, а его крупность не превышает некоторого значения.

Чаще всего производительность дробилок ударного действия определяют экспериментальным путем. Эмпирические зависимости учитывают влияние выбранных параметров, но не отражают физической сути происходящих процессов. Влияние большого количества факторов, не позволяющих инженерными методами определить производительность, учитывается поправочными коэффициентами, которые определяются экспериментально.

Производительность дробилки определяется рядом последовательных операций разрушения и перемещения материала к разгрузочному окну.

На рисунке 2 представлена идеализированная схема движения материала в рабочей камере дробилки. Условно предполагается, что частицы измельчаемого материала, движутся по винтовой траектории.

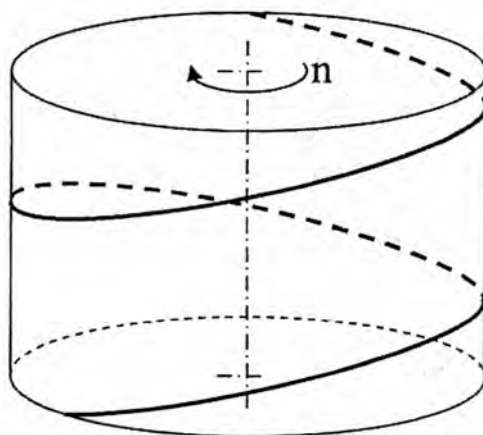


Рисунок 2 – Схема движения материала в рабочей камере дробилки

На рисунке 3 представлена схема к расчету конструктивных параметров дробилки.

Максимальная производительность будет тогда, когда после первого контакта (удара) ударного элемента с частицей материала последняя полностью удаляется из камеры дробления. Но при этом всегда существует вероятность, что частица материала не проникнет или недостаточно глубоко проникнет в рабочую зону ударных элементов, поэтому некоторая доля частиц материала не будет раздроблена. Это увеличивает количество недоизмельченного материала, который приходится дополнительно перерабатывать.

На стадии предварительного расчета производительность можно определить по формуле

$$Q = 3600 \cdot \gamma_m \cdot A \cdot V \cdot K_m \cdot K_k, \quad (1)$$

где γ_m – плотность материала, т/м^3 ;

A – площадь истечения материала в камере дробления,

$$A = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4};$$

D – внутренний диаметр камеры дробления, м;

d – внутренний диаметр слоя материала в камере дробления,

$$d = K_1 \cdot D;$$

K_1 – объемный коэффициент, зависящий от плотности материала;

V – линейная скорость ударных элементов, м/с;

K_m – коэффициент, зависящий от типа материала;

K_k – конструктивный коэффициент.

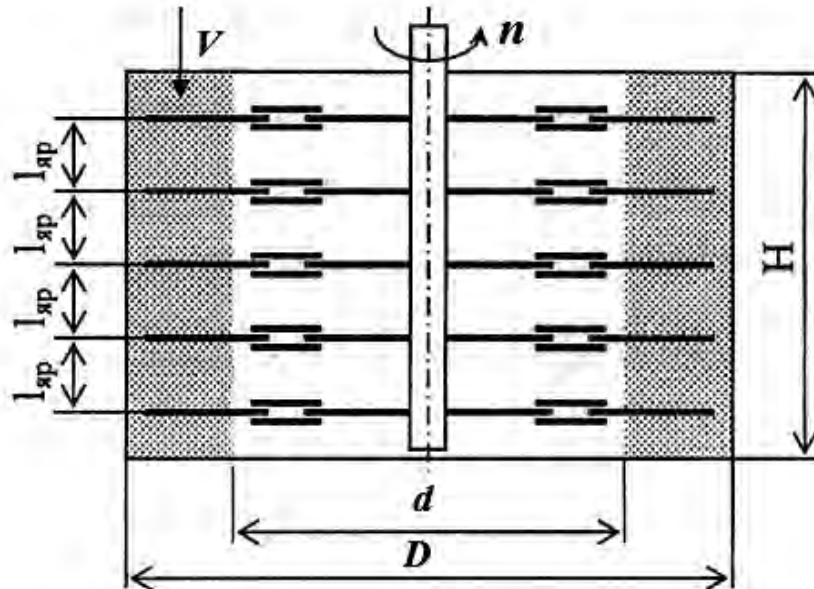


Рисунок 3 – Схема к расчету конструктивных параметров дробилки

Определение расчетной мощности. Мощность электродвигателя дробилки определяется как сумма мощностей:

$$N_{\Sigma} = N_1 + N_2, \quad (2)$$

где N_1 – мощность, затрачиваемая на перемещение материала, кВт;

N_2 – мощность, затрачиваемая на дробление материала, кВт.

Мощность, затрачиваемая на перемещение материала, определяется по формуле

$$N_1 = F_f \cdot V_m, \quad (3)$$

где F_f – сила трения, Н;

V_m – окружная скорость движения материала, м/с.

Сила трения рассчитывается по формуле

$$F_f = F_n \cdot f, \quad (4)$$

где F_n – центробежная сила инерции, Н;

f – коэффициент трения материала о сталь.

$$F_n = m \cdot \left(\frac{D+d}{4} \right) \cdot \omega^2 \cdot K_2^2, \quad (5)$$

где m – масса материала в камере дробления, т;

D – внутренний диаметр камеры дробления, м;

d – внутренний диаметр слоя материала в камере дробления, м;

ω – угловая частота вращения вертикального вала, с^{-1} ;

K_2 – коэффициент, учитывающий соотношение величин угловой частоты вращения вертикального вала и угловой частоты вращения материала.

Масса материала определяется из уравнения

$$m = H \cdot A \cdot \gamma_m \cdot K_3, \quad (6)$$

где H – высота камеры дробления, м;

A – площадь истечения материала в камере дробления, м^2 ;

γ_m – плотность материала, т/м^3 ;

K_3 – коэффициент заполнения камеры материалом.

Окружная скорость движения материала

$$V_m = 0,5 \cdot D \cdot \omega \cdot K_2. \quad (7)$$

Преобразуем формулу (3), для чего проведем подстановки.

После преобразования имеем

$$N_1 = \frac{\pi \cdot D^4}{32} (1 + K_1 - K_1^2 - K_1^3) \cdot H \cdot \omega^3 \cdot K_2^3 \cdot K_3 \cdot f \cdot \gamma_m \cdot (1 - K_1^2) \cdot (1 + K_1). \quad (8)$$

Мощность, затрачиваемая на дробление материала, определяется по формуле



$$N_2 = F_p \cdot V_y^0, \quad (9)$$

где F_p – сила сопротивления перемещению ударных элементов в слое материала, Н;

V_y^0 – скорость движения ударных элементов относительно материала, м/с.

$$F_p = A_y \cdot K_p \cdot n_y, \quad (10)$$

где A_y – площадь ударного элемента, участвующая в дроблении материала, м²;

K_p – коэффициент сопротивления перемещению в слое материала, Н/м²;

n_y – общее число ударных элементов.

$$A_y = 0,5 \cdot (D - d) \cdot h_y, \quad (11)$$

где h_y – толщина ударного элемента, м.

$$n_y = n_a \cdot n_b, \quad (12)$$

где n_a – количество ярусов ударных элементов;

n_b – количество ударных элементов на ярусе.

$$V_y^0 = V_y - V_m, \quad (13)$$

где V_y – окружная скорость движения ударных элементов, м/с;

V_m – окружная скорость движения материала, м/с.

Преобразуем формулу (9), для чего проведем подстановки.

После преобразования имеем

$$N_2 = 0,25 \cdot D^2 \cdot h_y \cdot K_p \cdot n_b \cdot n_a \cdot \omega \cdot (1 - K_1) \cdot (0,5 + K_1 - K_2). \quad (14)$$

Следует отметить, что полученное значение производительности и мощности (без учета n) является приближенным, однако с достаточной точностью позволяет оценить производительность дробилок и мощность привода.

Использование полученных формул дает возможность определять



производительность дробилок и мощность привода и сравнивать с реально работающими дробилками на материале, который перерабатывается в производственных условиях.

Порядок выполнения работы

- 1 Перед студентами ставится цель работы.
- 2 Студенты делятся на две группы. Перед каждой ставится задача по переработке конкретного материала.
- 3 Студенты изучают дисперсный состав, определяют влажность продукта и выбирают режимы его переработки.
- 4 На основании теоретических зависимостей каждая из групп аналитически определяет основные параметры дробильной установки.
- 5 Изучив конструкцию и замерив основные параметры установки, студенты производят измельчение влажных продуктов, контролируя при этом основные показатели процесса.
- 6 Одна из групп производит дробление и сушку путем ввода в дробилку нагретого воздуха.
- 7 Полученные результаты анализируются, строятся необходимые графики и таблицы.
- 8 Каждый студент индивидуально оформляет и защищает отчет.

Контрольные вопросы

- 1 Охарактеризуйте конструкцию дробилки Д-400 и дайте ей оценку.
- 2 Как влияет влажность материала на процессы дробления и сушки?
- 3 Какие конструктивные параметры необходимы для улучшения дробления влажных материалов?
- 4 Как движется материал в рабочей зоне дробилки?
- 5 Как движутся воздушные потоки в рабочей зоне дробилки?
- 6 Как определить степень дробления?
- 7 Какие основные факторы влияют на процесс дробления влажных материалов?
- 8 Как определить мощность привода дробилок ударного действия?
- 9 Как определить производительность дробилок ударного действия?
- 10 Как обеспечить лучшую сушку в дробилках ударного действия?
- 11 Какие факторы влияют на мощность привода дробилки ударного действия?
- 12 Какие факторы влияют на производительность дробилки ударного действия?
- 13 В чем особенность работы дробилок на влажных материалах?
- 14 Определите удельные показатели работы дробилки.



Лабораторная работа № 4. Исследование рабочего процесса смесителя принудительного действия

Цель работы: определить качество смешивания, производительности и потребляемой мощности для различных типов смесителей.

Оборудование: два лабораторных смесителя, измерительный комплект К–50, секундомер, линейка, мерная емкость, весы, пробоотборник, набор сит, лабораторный конус № 1, формы металлические, пресс гидравлический.

Общие сведения

Смешивание – один из основных процессов строительного производства, имеющий своей целью получить из нескольких материалов однородную смесь, обладающую новыми свойствами по сравнению с исходными свойствами компонентов.

Основным современным строительным материалом является бетон, получаемый соединением щебня (гравия), песка, цемента, воды и при необходимости специальных добавок в определенной пропорции при равномерном распределении этих компонентов между собой.

При смешивании частицы компонентов перемещаются в объеме смесителя относительно друг друга под воздействием импульсов, передаваемых смешиваемой среде рабочими органами. Из всех видов смешивания наиболее распространено механическое, осуществляемое в смесителях гравитационного и принудительного действия.

Смесители принудительного действия являются наиболее перспективными машинами, так как позволяют получать смеси любой консистенции за короткое время.

Основной параметр смесителей циклического действия – емкость замеса, смесителей непрерывного действия – производительность.

Смесители принудительного действия выпускаются двух видов: с горизонтальными смесительными валами и корытообразным корпусом (лотковые) и с вертикальными смесительными валами и цилиндрическим чашеобразным корпусом (тарельчатые).

Теоретическая часть

Определение потребляемой мощности. Рассмотрим методику расчета сопротивлений, возникающих в мешалке в процессе смешивания, и мощности, потребной для преодоления этих сопротивлений. В настоящее время нет общепринятой методики расчета мощности. Причинами этого являются сложность процесса смешивания минеральных материалов с вяжущими и влияние на этот процесс большого числа факторов. Можно

отметить два пути, по которому направлены исследования процесса смешивания.

В основу первого положен учет небольшого числа факторов, характеризующих процесс и позволяющих на основе законов механики установить расчетную формулу для потребляемой мощности. По второму пути направлены исследования, в основу которых положена гипотеза, что сопротивления, имеющие место при изучении процесса смешивания, следует рассчитывать по законам гидродинамики.

В общем случае момент M , Н·м, необходимый для вращения лопасти (рисунок 1), определяется как

$$M = \int_{r_B}^{r_H} k \cdot r \cdot b \cdot d \cdot r = k \cdot b \frac{(r_H^2 - r_B^2)}{2}, \quad (1)$$

где k – коэффициент сопротивления движению лопасти;

b – проекция ширины лопасти на плоскость, перпендикулярную направлению движения, м;

r_H , r_B – радиусы наружной и внутренней кромок лопасти, м.

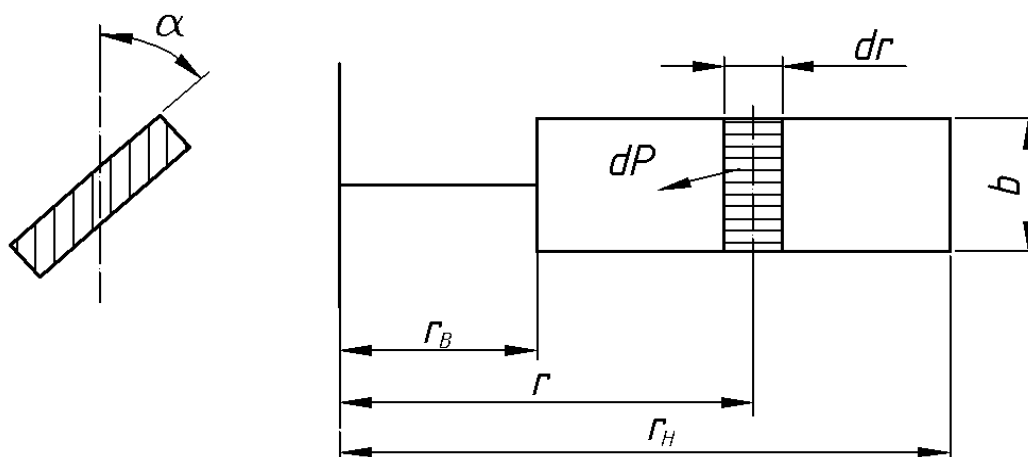


Рисунок 1 – Схема к расчету мощности привода принудительных смесителей

Для смесителей с горизонтальными валами, имеющих лопасти одинакового размера, мощность двигателя N , кВт, определяют по следующим формулам:

$$N = \frac{M \cdot \omega \cdot z \cdot \varphi}{1000 \cdot \eta}; \quad (2)$$

$$N = \frac{\omega \cdot k \cdot b \cdot (r_H^2 - r_B^2) \cdot z \cdot \varphi}{2000 \cdot \eta}, \quad (3)$$

где ω – угловая скорость вала, рад/с;

z – число лопастей;

η – КПД привода;

φ – коэффициент, учитывающий степень нагружения лопастей в смеси (для лотковых смесителей можно принять $\varphi = 0,5$).

Для определения мощности N , кВт, привода роторного смесителя можно пользоваться формулой К. М. Королева

$$N = \frac{k \cdot \omega \cdot \sum F_i \cdot R_i}{\eta}, \quad (4)$$

где k – коэффициент сопротивления (таблица 1), МПа;

ω – угловая скорость ротора, рад/с;

F_i – активная площадь i -й лопасти, м²;

R_i – средний радиус движения i -й лопасти, м;

η – КПД привода.

Таблица 1 – Формулы расчета коэффициента сопротивления тяжелой бетонной смеси

Вид бетонной смеси	Осадка конуса, см	Жесткость	Зависимость коэффициента сопротивления k , кПа, от средней линейной скорости лопастей V_{CP} , м/с
Жесткая	0	12–18	$k = 28,5 + 4,88 \cdot v_{CP}^2 + 1,21 \cdot v_{CP}$
Малоподвижная	0–2	4–12	$k = 25,7 + 4,88 \cdot v_{CP}^2 - 1,51 \cdot v_{CP}$
Подвижная	4–6	–	$k = 20,9 + 4,88 \cdot v_{CP}^2 - 7,24 \cdot v_{CP}$
Весьма подвижная	10–12	–	$k = 20,5 + 4,88 \cdot v_{CP}^2 - 11,79 \cdot v_{CP}$
Литая	Св. 15	–	$k = 20,1 + 4,88 \cdot v_{CP}^2 - 14,02 \cdot v_{CP}$

Качественное приготовление бетонной смеси на этапе смешивания оценивают опосредованно с помощью осадки корпуса. При этом смешивание считается хорошим, когда колебания осадки корпуса для проб смеси, взятых из различных объемов корпуса смесителя, составляют не более 1 см. Основным показателем качества бетона является его прочность на сжатие $R_{СЖ}$, т. е. марка бетона. Для определения марки бетона из приготовленной смеси формируют образцы-кубы и производят их разрушение на прессе. Кубы до разрушения должны выстоять 28 сут.

Прочность бетона \bar{R} в серии образцов оценивают по формуле



$$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{n}, \quad (5)$$

где \bar{R} – среднее значение прочности бетона серии образца;

R_i – значение прочности отдельного образца;

n – число образцов.

Формула (5) применяется в тех случаях, когда коэффициент вариации прочности бетона не превышает 15 %.

Определение производительности. Производительность смесителей циклического действия Π , м³/ч, определяется по формуле

$$\Pi = \frac{V_3 \cdot z}{1000}, \quad (6)$$

где V_3 – емкость смесителя (по выходу готовой смеси), л;

z – число циклов в час, $z = 3600/T$.

Время одного цикла

$$T = t_1 + t_2 + t_3, \quad (7)$$

где t_1 – время загрузки, с;

t_2 – время смешивания, с;

t_3 – время выгрузки, с.

Производительность смесителя непрерывного действия Π , м³/ч, рассчитывается по формуле

$$\Pi = 3600 \cdot F \cdot v_{oc}, \quad (8)$$

где F – площадь поперечного сечения материала в смесителе, м²;

v_{oc} – скорость осевого перемещения материала, м/с.

Порядок выполнения работы

Работа выполняется параллельно на двух смесителях звеньями по 3–4 человека в каждом.

Смеситель с горизонтальным валом. По формуле (3) аналитически определить потребляемую мощность, производя необходимые замеры конструктивных параметров, и построить график зависимости потребляемой мощности от угла установки лопастей.

Сделать вывод.



Смеситель с вертикальным валом. Изучить конструкцию смесителя.

Для различных типов смесителей, используя формулы (3), (4), (6), (9), экспериментально определить производительность $П$ и потребляемую мощность двигателя N .

Приготовить навеску компонентов на шесть образцов смеси строительного раствора.

Вручную смешать компоненты и заформовать три формы-куба.

На одном из смесителей с рабочим органом в виде кинематически деформируемой спирали приготовить смесь раствора и заформовать три формы-куба.

После выдерживания образцов в течение двух недель на второй паре занятия определить марку образцов-кубов, используя формулу (8). Разрушение образцов произвести на гидравлическом прессе.

Определить степень активации, т. е. прирост прочности у активированных образцов.

Контрольные вопросы

- 1 Назначение и область применения смесителей.
- 2 Основные параметры смесителей.
- 3 Как определить потребляемую мощность смесителя?
- 4 Как определить однородность смешивания?
- 5 Как влияет время смешивания на однородность смеси?

Лабораторная работа № 5. Изучение конструкции, принципа действия питателей, определение их основных параметров.

Цель работы: изучение конструкции и принципа действия пластинчатого, тарельчатого и шнекового питателей, расчет производительности и потребляемой мощности привода питателей.

Оборудование: пластинчатый питатель, ленточный питатель, шнековый питатель, измерительный инструмент.

Питатели применяют для равномерной и непрерывной подачи материалов из бункеров на транспортирующие машины, в дозирующие аппараты и другое технологическое оборудование. Питатели стабилизируют технологический процесс и работу машин, способствуют механизации и автоматизации производства.

Пластинчатый питатель. Пластинчатые питатели применяют в основном для равномерной подачи кускового материала в дробилки и при транспортировке клинкера после обжига в печах (рисунок 1).



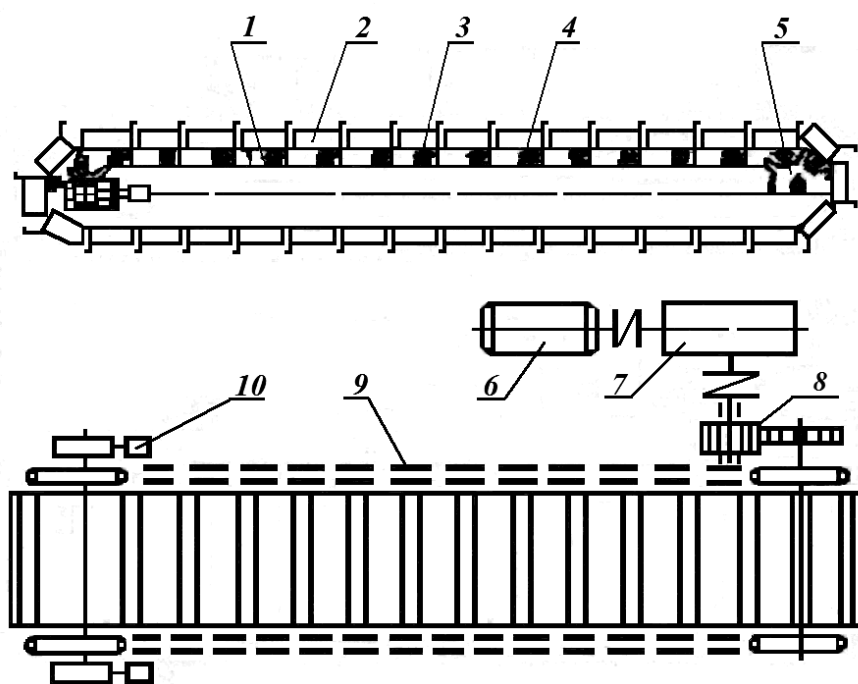


Рисунок 1 – Схема пластинчатого питателя

Пластинчатые питатели выпускают двух видов:

- 1) тяжелого типа – для транспортирования материалов крупностью 0,2–1,2 м;
- 2) нормального – для транспортирования материалов крупностью до 0,5 м.

По характеру движения рабочего органа пластинчатые питатели относятся к питателям с непрерывным движением по замкнутому контуру.

Пластинчатый питатель представляет собой бесконечный цепной рабочий орган, состоящий из звеньев-пластин 1 с бортами, звенья-пластины соединены посредством пальцев 3 с роликами 4, которые захватываются зубьями тяговой звездочки 5.

Привод питателя состоит из двигателя 6 и редуктора 7 с зубчатой парой 8, передающей вращение тяговой звездочке 5. Цепь натягивается посредством двух натяжных винтов 10, поддерживаемых верхним и нижним роликами.

Тарельчатый питатель. Тарельчатые питатели применяются для непрерывного и равномерного питания перерабатывающих машин порошкообразными и кусковыми материалами крупностью до 0,15 м, а также для объемного дозирования порошкообразных материалов в непрерывных технологических процессах.

Достоинства тарельчатых питателей – компактность и простота конструкции установки.

Недостатки – ограниченная область применения.

Питатель устанавливают на основание или подвешивают к бунке-

ру. Отечественная промышленность выпускает тарельчатые питатели с диаметром тарели 0,5–3,0 м и частотой вращения тарели 4–7 мин¹, 9–24 мин¹.

Кинематическая схема тарельчатого питателя, состоящего из электродвигателя 1, ножа 5, регулировочного устройства с подвижной обоймой 6, бункера 7, основания 8, приведена на рисунке 2.

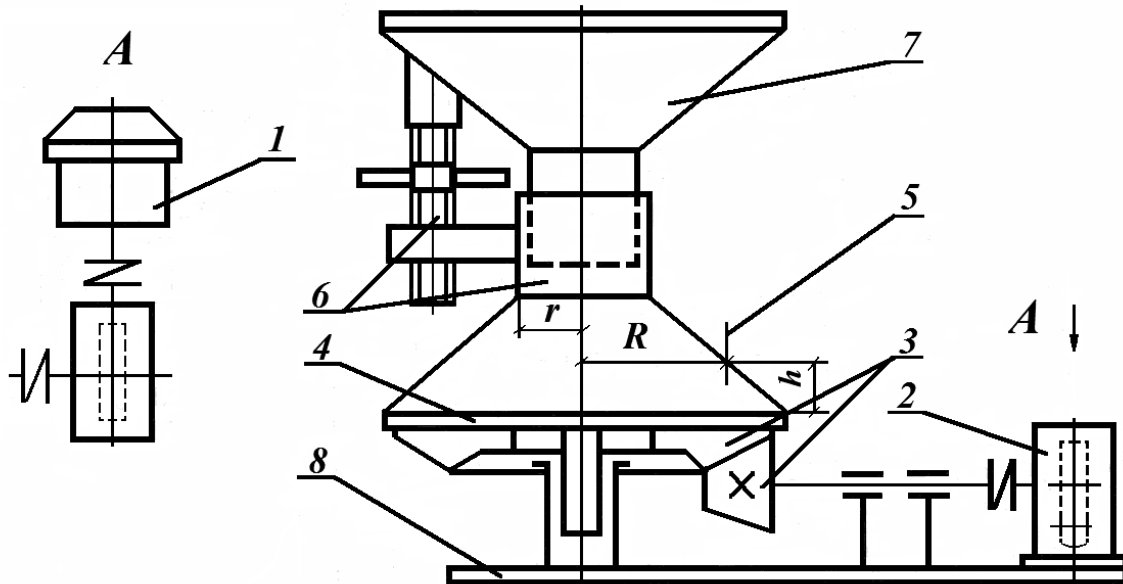


Рисунок 2 – Схема тарельчатого питателя

Исходный материал попадает из бункера 7 на вращающуюся тарель 4, где он рассыпается под углом естественного откоса. Слой материала с тарели срезается ножом 5 и сбрасывается в разгрузочный лоток. Изменяя положение ножа, можно уменьшить или увеличить сечение срезаемого слоя материала, регулируя при этом производительность питателя. При необходимости резкого изменения количества подаваемого материала изменяется положение подвижной обоймы.

Угол естественного откоса материала зависит от вида материала, его влажности и зернового состава. Поэтому производительность при одном и том же положении ножа и подвижной обоймы не остается постоянной, а изменяется в зависимости от указанных факторов. В связи с этим обслуживающему персоналу постоянно приходится регулировать подачу материала.

Шнековые питатели. Шнековые винтовые питатели нашли широкое применение в установках, выполняющих функции транспортирования в сочетании с технологическими операциями. В зависимости от угла наклона β оси к горизонту шнеки подразделяют на горизонтальные ($\beta = 0$), пологонаклонные ($0 < \beta < 30$), крутонаклонные ($30 < \beta < 60$), вертикальные

($60 < \beta \leq 90$). Выпускают шнеки тихоходные и быстроходные, стационарные и передвижные.

Шнековый питатель – это устройство, непрерывно перемещающее материал посредством вращающегося в неподвижном кожухе (корпусе) винта, называемого шнеком (рисунок 3). Корпус шнека изготавливают из трубы или листовой стали толщиной 3–5 мм. В промышленности строительных материалов встречаются шнеки следующих конструкций:

- сварные, в которых вал шнека изготовлен из трубы с приваренными к ней цапфами, и винтовой поверхностью по длине трубы (вала);
- литые из отбеленного чугуна с большой сопротивляемостью износу.

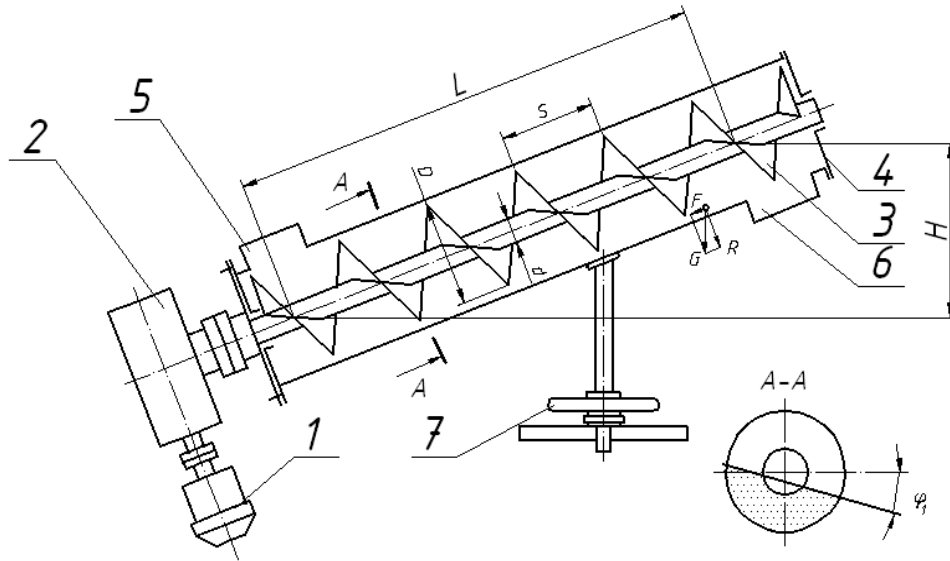
В зависимости от целевого назначения питателя предусматривают шнеки:

- со сплошной винтовой поверхностью – для перемещения мелкокусковых и сыпучих материалов;
- ленточные, имеющие винтовую поверхность, изготовленную из узкой стальной полосы, которая укреплена на валу с зазором. Это способствует тому, что во время транспортирования материал переваливается через виток, тем самым улучшается качество перемещения;
- лопастные, состоящие из установленных на валу по винтовой линии лопастей, которые при транспортировке рыхлят и перемешивают материал;
- фасонные с вырезами по наружной кромке винтовой поверхности, предназначенные для перемещения слежавшихся масс.

В корпусе питателя укреплены подшипники, на которые опирается вал шнека. На конце вала, где воспринимаются осевые нагрузки, возникающие при транспортировании материала в горизонтальных питателях, устанавливают упорный и радиальный подшипники. В наклонных питателях этот подшипниковый узел воспринимает еще и составляющую массу шнека. Другой конец вала опирается на радиальный подшипник.

Материал, поступающий через загрузочный патрубок 5 в корпус 4 (см. рисунок 3), перемешивается в нем при помощи шнека 3, вращающегося подобно гайке винта, удерживаемого от проворачивания силами трения. Сила трения материала о внутреннюю поверхность корпуса питателя возникает в результате действия инерционных сил, вызванных вращением шнека, и массы транспортируемого материала. Если сила прижатия и связанная с ней сила трения о внутреннюю поверхность корпуса будут достаточно велики, то окружная скорость частиц материала будет меньше окружной скорости винтовой поверхности. Из-за разности этих скоростей материал начнет перемещаться вдоль корпуса питателя.





1 – электродвигатель; 2 – редуктор; 3 – шнек; 4 – корпус; 5 – загрузочный патрубок; 6 – разгрузочный патрубок; 7 – устройство для изменения угла наклона

Рисунок 3 – Кинематическая схема шнекового питателя

Расчет основных параметров

Производительность пластинчатого питателя. Производительность пластинчатого питателя определяется по формуле

$$Q = B \cdot h \cdot V \cdot \varphi \cdot \rho, \quad (1)$$

где B – ширина пластин, м. Ширина пластин должна в 1,8–2 раза превышать размер в поперечном сечении максимального куска;

h – высота бортов, м;

V – скорость движения цепи в зависимости от типа питателя, $V = 0,05–0,15$ м/с;

φ – коэффициент заполнения, $\varphi = 0,7–0,8$.

Мощность привода пластинчатого питателя. Мощность привода пластинчатого питателя P , Вт, определяют, исходя из тягового усилия и скорости движения полутoka:

$$P = \frac{W \cdot V}{\eta}, \quad (2)$$

где W – суммарное тяговое усилие, Н;

η – КПД привода.

$$W = W_1 + W_2 + W_3. \quad (3)$$

Соппротивление движению грузеной ветви питателя W_1 , Н, определя-
ется как

$$W_1 = (q_1 + q_2) \cdot L \cdot K \cdot w \cdot (\cos \beta \pm \sin \beta), \quad (4)$$

где L – расстояние между центрами звездочек, м;
 K – коэффициент сопротивления движению, $K = 0,1$;
 w – коэффициент, учитывающий преодоление приводом сил инерции рабочего органа, $w = 1,5$;
 β – угол установки пластинчатого питателя, град;
 q_2 – интенсивность распределенной нагрузки от метра длины по-
лотна, $q_2 = 200\text{--}500$ Н/м;
 q_1 – интенсивность распределенной нагрузки от материала, при-
ходящейся на метр длины полотна, Н/м.

$$q_1 = B \cdot h \cdot l \cdot n \cdot g \cdot \rho, \quad (5)$$

где l – длина ковша, м;
 n – количество ковшей на 1 п. м ленты;
 g – ускорение силы тяжести, $g = 9,81$ м/с².
 ρ – плотность материала, кг/м³.

Соппротивление движению холостой ветви питателя W_2 , Н, рассчиты-
вается по формуле

$$W_2 = q_2 \cdot L \cdot K \cdot (\cos \beta \pm \sin \beta). \quad (6)$$

Соппротивление движению при прогибе цепи на приводной и натяж-
ной звездочках W_3 , Н, определяется следующим образом:

$$W_3 = 0,15 \cdot (W_1 + W_2). \quad (7)$$

Производительность тарельчатого питателя. Производительность
тарельчатого питателя рассчитывается по формуле

$$Q = \left[\frac{\pi \cdot h}{3} \cdot (R^2 + r^2 + R \cdot r) - \pi \cdot r - \pi \cdot r^2 \cdot h \right] \cdot n \cdot \rho, \quad (8)$$

где h – высота кольца материала, снимаемого ножом (см. рису-
нок 2), м;
 R – радиус нижнего усеченного конуса материала, срезаемого
скребком, м;



r – радиус верхней кромки кольца материала, м;

n – частота вращения тарели, с^{-1} ;

ρ – плотность материала, кг/м^3 .

Как видно из формулы (8), частота вращения тарели влияет на производительность питателя. Однако увеличивать ее можно до определенного предела, выше которого материал под действием центробежных сил сбрасывается с тарели.

Должно быть соблюдено условие

$$m \cdot \omega^2 \cdot R \leq f \cdot mg \quad \text{или} \quad \frac{mV^2}{R} \leq f \cdot mg, \quad (9)$$

где f – коэффициент трения материала о диск, принимаем $f = 0,3$;

g – ускорение силы тяжести, м/с^2 ;

m – масса материала, кг;

ω – угловая скорость, $\omega = V/R$;

V – окружная скорость тарели:

$$V = \pi D n = 2 \pi R n. \quad (10)$$

Отсюда получают критическую частоту вращения тарели

$$n_{кр} = \frac{0,2 + 5}{\sqrt{R}} \quad \text{или} \quad n_{кр} = \frac{0,386}{\sqrt{D}}. \quad (11)$$

Мощность привода тарельчатого питателя. За один оборот тарели снимается определенное количество материала, силу тяжести которого F_g , Н, определяют по формуле

$$F_g = \frac{Q \cdot g}{n}. \quad (12)$$

Усилие, приходящееся на тарель от столба материала F , Н, находящегося внутри обоймы,

$$F = 22,4 \cdot r \cdot \rho. \quad (13)$$

Работа W , Дж, затрачиваемая на преодоление сил трения за один оборот тарели,

$$W = f \cdot F_g \cdot L_1 + f_n \cdot F \cdot L_2, \quad (14)$$



где f_n – коэффициент внутреннего трения материала, $f_n = 0,6–0,9$;
 L_1 – путь центра тяжести сбрасываемого материала;
 L_2 – путь центра тяжести материала в обойме, м.

$$L_1 = 2\pi \left(\frac{R+r}{2} \right), \quad (15)$$

Учитывая дополнительное сопротивление, возникающее между талерью и ножом, а также КПД привода, определяют установочную мощность привода питателя

$$P_{\text{дв}} = \frac{K \cdot W \cdot n}{\eta}, \quad (16)$$

где $P_{\text{дв}}$ – мощность двигателя, Вт;
 η – КПД привода питателя, $\eta = 0,6–0,75$;
 K – коэффициент дополнительных сопротивлений, $K = 1,25–1$.

Характерная особенность горизонтальных и пологонаклонных винтовых транспортеров состоит в том, что угол поворота свободной поверхности слоя перемещаемого материала не превышает угла естественного откоса материала в движении:

$$Y_1 \leq Y \approx 0,7Y_0, \quad (17)$$

где Y_1 – угол поворота свободной поверхности слоя материала (см. рисунок 1);

Y – угол естественного откоса материала в движении;

Y_0 – угол естественного откоса материала в покое (таблица 1).

Таблица 1 – Углы естественного откоса для различных материалов

Материал	Угол естественного откоса	Угол внутреннего трения	Коэффициент трения материала о корпус питателя	Насыпная плотность материала, т/м ³
Песок	30–35	32	0,4	1,65
Гравий	40–45	40–45	0,8–1,0	1,5–1,9
Щебень	40–45	40–45	0,63	1,8–2,0
Гипс	30–35	–	0,65	1,4
Известь	45–50	45–50	–	1,7–1,8
Цемент	30–40	30–40	0,65	1,3–1,6
Земля	30–40	35–40	0,9–1,0	1,2–1,4
Глина	40–45	40–45	0,7–0,9	1,0–1,5

Производительность шнекового питателя. Производительность шнекового питателя определяют по формуле



$$Q = 3600 \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} v_T \cdot \gamma \cdot c \cdot \psi, \quad (18)$$

где D – наружный диаметр шнека, м;

d – диаметр вала шнека, м;

v_T – теоретическая скорость транспортирования материала

вдоль корпуса шнека, $v_T = S \cdot n$;

n – частота вращения шнека, с^{-1} ;

γ – насыпная плотность материала (см. таблицу 1), т/м^3 ;

c – коэффициент, учитывающий проскальзывание материала относительно шнека;

ψ – коэффициент заполнения корпуса питателя материалом, $\psi = 0,2-0,4$.

В шнековых питателях материал перемещается поступательно, вдоль оси шнека, поэтому затраты мощности на преодоление сил трения и перемещения материала у горизонтальных и пологонаклонных питателей меньше, чем у вертикальных и крутонаклонных.

Силу тяжести материала, находящегося в корпусе шнека, определяют по формуле

$$G = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \gamma \cdot \psi \cdot L \cdot g, \quad (19)$$

где L – путь транспортирования материала, м;

g – ускорение силы тяжести, м/с^2 .

Нормальная и осевая составляющие силы тяжести материала

$$R = G \cdot \cos \beta; \quad P = G \cdot \sin \beta, \quad (20)$$

где β – угол установки питателя к горизонту.

Силу трения материала о корпус шнека рассчитывают по формуле

$$T = R \cdot f. \quad (21)$$

Продольные силы, действующие на шнек, определяют следующим образом:

$$P + T = \frac{\pi(D^2 - d^2) \cdot \gamma \cdot (H + L \cdot \cos \beta \cdot f) \cdot g}{4}, \quad (22)$$

где H – высота подъема материала, м;



f – коэффициент трения материала о корпус питателя (см. таблицу 1).

Мощность привода шнекового питателя. Мощность привода шнекового питателя рассчитывают по формуле

$$N = \frac{k \cdot (P + T) \cdot D_0 \cdot n \cdot \operatorname{tg}(\alpha_0 + \delta)}{2 \cdot 1000 \cdot r_{\text{ПП}}}, \quad (23)$$

где k – коэффициент, учитывающий сопротивление при движении материала внутри корпуса, $k = 3,5-4$;

D_0 – средний диаметр шнека, $D_0 = 2/3D$;

δ – угол трения материала о шнек (см. таблицу 1);

$r_{\text{ПП}}$ – КПД привода шнекового питателя, $r_{\text{ПП}} = 0,6-0,85$;

α_0 – угол подъема винтовой линии шнека на диаметр.

$$\operatorname{tg} \alpha_0 = \frac{S}{\pi \cdot D_0} = \frac{3 \cdot S}{2 \cdot \pi \cdot D_0}, \quad (24)$$

где S – шаг шнека, м.

Порядок выполнения работы

1 Изучить конструкцию и принцип действия пластинчатого, тарельчатого и шнекового питателей, опробовать их в работе без нагрузки материалом.

2 Вычертить схему пластинчатого, тарельчатого и шнекового питателей.

3 Произвести замеры: ширины пластин B , м; высоты бортов h , м; наружного диаметра втулки ролика d , м; диаметра ролика D , м, для пластинчатого питателя.

4 Произвести расчеты основных параметров пластинчатого питателя, производительности и мощности привода.

5 Произвести необходимые замеры высоты кольца материала h , м, снимаемого ножом; радиуса нижнего усеченного конуса материала R , м; радиуса наружной обоймы для тарельчатого питателя r , м.

6 Произвести расчеты производительности и мощности привода тарельчатого питателя.

7 Определить коэффициент проскальзывания материала для шнекового питателя относительно шнека в зависимости от угла установки питателя, для чего зафиксировать путь, проделанный материалом в единицу времени при соответствующем угле β (при $\beta = 0$, $c = 1$):



$$c = 1 - \frac{v_n}{v_T}, \quad (25)$$

где v_n – скорость транспортирования материала вдоль корпуса питателя, м/с.

8 Рассчитать производительность шнекового питателя при соответствующих углах β 10–30° и построить график зависимости $Q = f(\beta)$.

9 Рассчитать потребную мощность электродвигателя при одном из углов установки шнекового питателя.

Контрольные вопросы

1 По каким классификационным признакам разделяют питатели?

2 Какие из питателей допускают реверсивное движение рабочего органа?

3 Дайте сравнительные характеристики ленточного и пластинчатого питателя.

4 При питании агрегата материалами клинкером ($T = 200$ °С), песком, шлаком ($\beta \geq 35$) какой питатель (ленточный или пластинчатый) может быть использован?

5 Какой из указанных параметров влияет на производительность и мощность привода пластинчатого питателя: B, L, h, ρ, β, V ?

6 Что предусмотрено в конструкции питателя для обеспечения необходимого натяжения ветвей питателя?

7 Возможно ли реверсивное вращение тарели питателя?

8 Влияет ли высота столба массы материала на производительность и мощность привода питателя?

9 Каким условием лимитируется частота вращения тарели питателя?

Лабораторная работа № 6. Составление рецептуры, выбор состава и определение расхода сырьевых материалов

Цель работы: изучение основ анализа сырьевых материалов, составление примерной рецептуры, выбор состава и определение расхода сырья и материалов для предприятий стройиндустрии.

Теоретическая часть

При производстве строительных материалов и изделий важнейшей задачей является анализ исходных компонентов, составление рецептуры, выбор состава, определение расхода сырьевых материалов. Главная проблема сырьевых переделов состоит в огромном многообразии и чрезвы-



чайной изменчивости физико-механических свойств, минерального состава, химических превращений исходных компонентов на различных этапах их технологической переработки.

Приведем несколько примеров, связанных с описанием, подбором и определением потребности в сырьевых компонентах для производства некоторых видов строительных материалов и изделий.

Потребность в сырьевых материалах. Удельный расход сырьевых компонентов на 1 м³ бетонной или растворной смеси принимается по нормам СН 220-62 или рассчитывается исходя из соотношения компонентов.

Часовую, сменную, суточную и годовую потребность материалов определяют по формуле

$$Q_i = q_i \cdot Q_t,$$

где q_i – удельный расход i -го компонента (материала) на 1 м³ смеси;

Q_t – расчетная или заданная производительность линии (установки) на рассчитываемую единицу времени t (час, смену и т. д.).

По результатам расчета составляется таблица 1.

Таблица 1 – Расход основных материалов на производство смеси

Материал	Единица измерения	Расход материала			
		м ³ /ч	м ³ /см	м ³ /сут	м ³ /год
Щебень	м ³				
Песок	м ³				
Цемент	т				
Добавки	кг				
Вода	м ³				

Сырье. Расход сырьевых материалов. Основными сырьевыми материалами при производстве керамических стеновых материалов являются глина в плотном, рыхлом и пластическом состоянии (основное сырье), отошующие и флюсы (добавки). Химический состав и дисперсность глин в значительной степени характеризуют их пригодность для производства того или иного вида керамических изделий. В таблице 2 приведен состав формовочной массы (из расчета 1000 шт. усл. кирпича) методом пластического (Кучинский и Даугельский заводы) и полусухого (Ленинградский завод) прессования.

Таблица 2 – Расход сырьевых материалов на 1000 шт. условного кирпича

Наименование компонентов формовочной массы	Единица измерения	Кучинский завод	Даугельский завод	Ленинградский завод
1	2	3	4	5
Глина	кг/м ³	2–2,2	1,5–1,6	2–2,1
Песок	кг/м ³	–	0,2–0,3	–

Окончание таблицы 2

1	2	3	4	5
Опилки	кг/м ³	0,3–0,5	–	–
Шамот*	кг/м ³	–	0,08–0,1	0,2–0,3
Уголь	т	0,04–0,06	0,04–0,05	0,04–0,05
Шлак	т	0,02–0,03	–	–

Примечание – * – искусственный отошающий материал, который получают обжигом огнеупорных глин при $t = 1200–1400$ °С с последующим измельчением до порошкообразного состояния

Потребность в сырьевых материалах можно рассчитать исходя из технической характеристики изделия, способа формования, расчетной или заданной производительности и других исходных параметров по следующим формулам:

– для пресс-порошка глиномассы

$$Q_{II} = (V_N - V_{II})K_p Q_r / K_{пот}, \quad (1)$$

где V_N – геометрический объем изделия, м³;

V_{II} – объем пустот в изделии, м³;

K_p – коэффициент разрыхления, соответствующий способу формования;

Q_r – расчетная (заданная) часовая производительность технологической линии, шт./ч;

$K_{пот}$ – коэффициент, учитывающий потери пресс-порошка на всех стадиях технологической переработки, $K_{пот} = 0,93–0,97$;

– для глины

$$Q_{Г} = Q_{II} \frac{\rho_{II}}{\rho_{Г}},$$

где ρ_{II} , $\rho_{Г}$ – плотности пресс-порошка и глины соответственно, кг/м³;

– для шликера

$$Q_{Ш} = Q_{Г} + \gamma_B Q_{Г}, \quad (2)$$

где γ_B – относительное содержание влаги (воды), $\gamma_B = 0,1–0,55$.

Средняя объемная плотность шликера рассчитывается по формуле

$$\rho_{Ш} = \frac{\rho_{Г}\gamma_{Г} + \rho_{В}\gamma_{В}}{\gamma_{В} + \gamma_{Г}}, \quad (3)$$



где ρ_G, ρ_B – плотности глины и воды соответственно;
 γ_G, γ_B – процентное содержание глины и воды в шликере соответственно;
 – для добавок

$$Q_D = Q_M \gamma_D, \quad (4)$$

где γ_D – относительное содержание добавок в глиномассе при пластическом способе формования;

Q_M – расход глиномассы в час, определяемый по формуле (1) для пресс-порошка.

Средняя объёмная плотность формовочной глиномассы

$$\rho_M = \frac{\rho_G \gamma_G + \rho_D \gamma_D}{\gamma_D + \gamma_G}, \quad (5)$$

где ρ_G, ρ_D – плотности глины и добавок соответственно;

γ_G, γ_D – процентное содержание глины и добавок в глиномассе соответственно.

В таблице 3 приведена потребность в сырьевых материалах при производстве обыкновенного кирпича.

Таблица 3 – Потребность в сырьевых материалах при производстве обыкновенного кирпича

Материал	Потребность			
	м ³ /ч	м ³ /см	м ³ /сут	м ³ /год
Пресс-порошок	6	40	75	21,980
Глина	4,3	34	53	18,200

Значения приведены для технологической линии производительностью 1,9 тыс. шт. усл. кирпича в час.

Далее можно рассчитать потребность в смену, сутки и год. Результаты расчета, как правило, заносят в таблицу.

Цементное сырье. Характеристика и расход. Виды топлива

Для приготовления (получения) цементной сырьевой смеси (муки, шихты, шлака) используются карбонатные, карбонатно-глинистые и глинистые горные породы, а также попутные продукты и промышленные отходы, заменяющие глинистую и частично карбонатную части, а также активные минеральные и корректирующие добавки.



В качестве карбонатных пород в цементном производстве используют известняки, мел, мергель и др., содержащие $MgO - 4 \%$; $SO_3 - 1,3 \%$; $(K_2O + Na_2O) - 1 \%$; $P_2O_5 - 0,4 \%$.

Для получения 1 т портландцемента требуется около 1,3–1,5 т известняка или мела.

Из глинистых пород в качестве цементного сырья используются в основном глины и суглинки, реже лесс, содержащие не более 10 % частиц крупнее 0,2 мм. Расход глинистых пород на 1 т клинкера составляет 0,27–0,3 т.

В качестве активных минеральных добавок используют горные породы осадочного (трепел) и вулканического (пемза, турфы) происхождения, а также искусственные материалы (доломит, шлак, зола и др.)

Из корректирующих добавок применяют природные и искусственные вещества (отходы производства), улучшающие значения силикатного и глиноземного модулей.

Средний расход добавок на 1 т клинкера составляет 0,010–0,035 т.

Расчет шихты производят по соответствующим формулам, например, по формуле З. Б. Энтина, либо с определением показателей, характеризующих химико-минералогический состав портландцементного клинкера: коэффициента насыщения K_n в пределах 0,88–0,92; силикатного (кремнеземного) модуля M в пределах 1,9–2,6 и др.

В таблице 4 приведен удельный расход основных сырьевых материалов при производстве цементного клинкера.

Таблица 4 – Удельный расход сырьевых материалов

Горная порода, добавки	Расход цементного клинкера, т
Карбонатные горные породы (известняк, мел, мергель, и др.)	1,3–1,5
Глинистые горные породы (глина, суглинок, лесс и др.)	0,27–0,30
Добавки (железистая, кремнеземистая, глиноземистая и др.)	0,01–0,035

Средний удельный расход сухих сырьевых материалов в цементном производстве составляет 1,6 т на 1 т цементного клинкера.

Например, известняк – 1,3; суглинок – 0,28; огарки пиритные – 0,02 т/т. Общий расход составляет 1,6 т/т.

При мокром способе производства цемента следует учитывать влажность шлама, которая может быть равна 32–46 %. Количество шлама можно определить по формуле

$$q_{ш} = q_c + q_c y_B, \quad (6)$$

где q_c – общий расход сырьевых материалов в пересчете на сухое



вещество;

y_B – относительное содержание влаги (влажность шлама в относительных единицах).

Средняя объемная плотность шлама рассчитывается по формуле

$$\rho_{ш} = \frac{\rho_C y_C + \rho_B y_B}{y_C + y_B}, \quad (7)$$

где ρ_C – плотность смеси в сухом виде;

y_C – процентное содержание смеси;

ρ_B – плотность воды;

y_B – процентное содержание воды в шламе.

Объемная плотность сухой смеси

$$\rho_C = \frac{\rho_{u(m)} y_{u(m)} + \rho_{z(c)} y_{z(c)} + \rho_o y_o}{y_{u(m)} + y_{z(c)} + y_o}, \quad (8)$$

где $\rho_{u(m)}$, $\rho_{z(c)}$, ρ_o – объемные плотности известняка (мела), глины (суглинка), огарков пиритных соответственно;

$y_{u(m)}$, $y_{z(c)}$, y_o – процентное содержание известняка (мела), глины (суглинка), огарков пиритных соответственно.

Значение объемной плотности соответствующих сырьевых материалов принимаются из справочной или учебной литературы, а их процентное содержание – из задания на проектирование.

По заданной (проектной, расчетной) мощности (производительности) цементного завода и принятому режиму работы можно определить часовую, сменную, суточную и годовую потребность основных сырьевых материалов и шахты (сырьевой муки, шлама), выбрать и рассчитать тип и вместимость складов, марку и количество основного и вспомогательного оборудования.

Сырьевые материалы при производстве силикатного кирпича

При производстве силикатного кирпича и камня в качестве сырья используется силикатная формовочная смесь (масса), состоящая из песка, известкового вяжущего, добавок и воды. Применяется песок кварцевый, кварцевополевошпатный и др. Средний удельный расход песка на 1000 шт. кирпичей составляет $2,32 \text{ м}^3$. В качестве вяжущих материалов используется воздушная известь, известково-бедиптовое вяжущее и др. Из добавок применяются золы, шлаки гидроэлектростанций (ГЭС) и металлургиче-



ские, пылеунос цементного производства и др.

Формовочная силикатная масса характеризуется следующими показателями: плотностью – 900–1200 кг/м³, влажностью – 6–8 %, модулем крупности песка – 1,2–2,2.

Объем формовочной смеси (массы) на 1000 шт. кирпичей можно определить по формуле

$$v_m = 1000v_k k_{раз} / k_{ном}, \quad (9)$$

где v_k – объем кирпича, м³;

$k_{раз}$ – коэффициент разрыхления (прессования), $k_{раз} = 1,3–1,7$;

$k_{ном}$ – коэффициент, учитывающий потери формовочной массы при технологической переработке, $k_{ном} = 0,93–0,97$.

Зная объем и плотность кирпича, удельный расход песка, вяжущего (извести), добавок, воды, можно рассчитать потребность в сырьевых материалах на производство полнотелого кирпича (таблица 5).

Таблица 5 – Расход сырьевых материалов на производство 1000 шт. одинарного полнотелого кирпича

Расход материалов	Сырьевой материал			Формовочная силикатная масса (смесь)
	Песок	Известковое вяжущее	Вода	
кг	2750	570	300	3620
м ³	1,96	0,74	0,3	3,0

Сырьевые материалы для производства асбестоцементных изделий

Основными сырьевыми материалами для производства асбестоцементных изделий являются асбест, цемент, вода и добавки.

Асбест – минерал группы серпантинов или амфиболов (таблица 6).

Таблица 6 – Основные физико-химические свойства асбеста

Показатель	Группа серпантинов	Группа амфиболов
Плотность, кг/м ³	2570–2660	2570–2660
Удельная поверхность, м ² /г	15–20	25–30
Гигроскопическая влажность, %	2,6–5	2,6–5
Прочность при растяжении, МПа:		
необработанного асбеста	3200–5400	3200–5400
обработанного асбеста	700–750	700–750
Модуль упругости, ГПа:		
необработанного асбеста	175–185	175–185
обработанного асбеста	70–80	70–80

Марки асбеста, предназначенные для производства изделий: П-3-30, П-4-40, П-5-65, М-3-60, М-4-30, М-6-30 и т. п. (первого сорта) и Ц-3-70,

П-4-30, П-5-50, М-6-40 и т. п. (высшего сорта).

Для производства асбестоцементных изделий применяют хризотил-овый асбест группы серпантинов.

Волокнистыми заменителями асбеста могут служить стекловолокна, сульфатная небеленая целлюлоза, макулатура, синтетические волокна и др.

В производстве асбестоцементных изделий применяется портланд-цемент марок 400 и 500.

Из химических добавок следует выделить полиакрилайд в количестве 75–150 г на 1 т сухих компонентов, метилцеллюлозу и др.

Асбест массой 20–50 кг поступает на заводы в бумажных мешках либо в пакетах.

Портландцемент поступает с цементных заводов специальным транспортом либо пневмотранспортом и хранится в бункерах или силосах.

Содержание асбеста A , %, разных марок в смеси определяется по формуле

$$A = \frac{100}{\frac{A_1}{a_1} + \frac{A_2}{a_2} + \dots + \frac{A_n}{a_b}}, \quad (10)$$

где A_1, \dots, A_n – содержание асбеста различных марок в асбестовой шихте, %;

a_1, \dots, a_b – эквивалентное количество асбеста разных марок, рекомендуемое для изготовления соответствующих изделий.

Содержание цемента в асбестовой шихте (смеси)

Содержание цемента C , %, в асбестовой шихте (смеси) определяется по формуле

$$C = 100 - A. \quad (11)$$

В общем случае содержание сырьевых материалов в смеси в пересчете на сухое вещество следующее: асбеста (18–26 %); цемента (82–74 %); добавок (75–150 г на 1 т цемента и асбеста); воды в суспензии (70–90 %).

Таким образом, зная техническую характеристику изделия, содержание основных компонентов в смеси и технологические требования на производство, можно определить расход и потребность в сырьевых материалах с учетом производительности технологической линии:

$$Y_A + Y_Z = 100 - Y_W, \quad (12)$$



где Y_A, Y_Z, Y_W – содержание асбеста, цемента и воды соответственно, %.
Удельный расход асбеста, цемента, воды и суспензии на производство одного изделия рассчитывается как

$$m_A = m_n Y_A^1; \quad m_{Ц} = m_n Y_{Ц}^1; \quad m_B = m_n Y_B^1; \quad m_c = m_n Y_C^1 + m_n, \quad (13)$$

где $Y_A^1, Y_{Ц}^1, Y_B^1, Y_C^1$ – относительное содержание асбеста, цемента, воды, суспензии соответственно.

Плотность суспензии

$$\rho_c = \frac{\rho_A Y_A + \rho_{Ц} Y_{Ц} + \rho_B Y_B}{Y_A + Y_{Ц} + Y_B}. \quad (14)$$

Объем суспензии

$$V_c = m_c / \rho_c. \quad (15)$$

Потребность в сырьевых материалах

$$Q_i = m_i Q_j, \quad (16)$$

где Q_i – потребность в асбесте, цементе, воде и суспензии;

m_i – удельный массовый расход асбеста, цемента, воды и суспензии;

Q_j – часовая, сменная, суточная и годовая производительность технологической линии.

В таблице 7 приведен расход сырьевых материалов на производство волнистых асбестоцементных листов производительностью 30 млн шт. усл. плиток в год.

Таблица 7 – Расход сырьевых материалов на производство волнистых листов производительностью 30 млн шт. усл. плиток в год

Материал	Удельный расход на одно изделие, кг/шт.	Расход			
		м ³ /ч	м ³ /см	м ³ /сут	м ³ /год
Асбест	7,44	1,31	9,18	27,55	8400
Цемент	18,74	3,30	23,13	69,39	24248
Вода	3,57	0,63	4,41	13,22	4032
Суспензия	29,75	5,25	36,72	110,16	33599

За условную плитку в производстве асбестоцементных изделий принята плитка размером 0,4×0,4×0,004 м, объемом 0,4×10⁻⁴ м³, массой 1,09 кг



и плотностью 1700 кг/ м³.

Коэффициент перевода из условной плитки в натуральное изделие

$$K_{\Pi} = m_u / m_{\text{усл.}}, \quad (17)$$

где m_u и $m_{\text{усл.}}$ – массы изделия и условной плитки соответственно.

Порядок выполнения работы

1 По заданию преподавателя студенты делятся на группы по 3–4 человека.

2 Перед студентами ставится цель лабораторной работы.

3 Каждой группе студентов выдается индивидуальное задание на подбор состава сырьевых компонентов для производства конкретного материала.

4 В лабораторных установках моделируются процессы изменения того или иного свойства сырьевого продукта и определяются значения параметров, определяющих эти изменения.

5 Изучив все материалы и выполнив необходимые исследования, студенты дают оценку соответствующим технологическим переделам.

6 Каждый студент оформляет индивидуально отчет по работе и защищает его.

Контрольные вопросы

1 Какие требования предъявляются к сырьевым материалам?

2 Какие методы подбора сырьевых материалов Вы знаете?

3 Какие физико-механические свойства сырьевых материалов являются главными при подборе состава сырьевых композиций?

4 Какие методы контроля свойств сырьевых материалов применяются при производстве цемента?

5 В чем суть раздельной и совместной технологии получения сырьевых смесей?

6 Опишите основные факторы, влияющие на количественный подбор сырьевых компонентов.

7 Как влияет влажность компонентов на технологии производств стройматериалов?

8 Что такое проектирование состава технологий?

9 Как влияет физико-химическая механика на формирование и управление сырьевыми переделами?

10 В чем состоят основы энергосбережения сырьевых переделов?



Список литературы

1 Технологические комплексы и линии для производства строительных материалов и изделий / В. С. Богданов [и др.]. – М. : МГСУ, 2003. – 199 с. : ил.

2 **Леонович, И. И.** Дорожно-строительные материалы / И. И. Леонович, А. К. Шумчик. – Минск : Выш. шк., 1983. – 224 с. : ил.

3 **Клушанцев, Б. В.** Дробилки / Б. В. Клушанцев, М. В. Косарев, А. В. Муйземник. – М. : Машиностроение, 1990. – 324 с. : ил.

4 Строительные машины : справочник в 3 т. / Под ред. В. А. Баумана, Ф. А. Лапира. – М. : Машиностроение, 1977. – Т. 2. – 496 с. : ил.

5 **Сиваченко, Л. А.** Анализ работы роторных дробилок ударного действия с вертикальным ротором / Л. А. Сиваченко, Е. И. Кутырко, А. Н. Хустенко // Механики XIX века : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Братск : БрГТУ, 2006. – С. 115–120.

