

ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ  
ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ  
(механические процессы)

Методические указания  
по выполнению практических работ



ПРИДНЕСТРОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
им. Т.Г.Шевченко

ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ



ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ  
(механические процессы)  
МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ

Тирасполь, 2016

УДК 664.002(072.8)

ББК Л81р30

П 84

Составители:

Ф.Ю.Бурменко доцент, Т.В.Боунегру доцент, А.П.Швецст.преп.

Рецензенты:

В.И.Юрченко, кандидат технических наук, доцент  
(Приднестровский государственный университет)

Г.В. Клинк, кандидат технических наук, доцент  
(Приднестровский государственный университет)

Процессы и аппараты пищевых производств (механические процессы) Методические указания по выполнению практических работ /составители: Ф.Ю.Бурменко, Т.В.Боунегру, А.П.Швец

В работе представлены практические работы, позволяющие студентам использовать теорию для решения практических задач. Перед решением кратко даны примеры задач рассматриваемого раздела. Издание содержит 5 тем для выполнения расчетных заданий.

Методические указания предназначены для студентов инженерных специальностей «Процессы и аппараты пищевых производств» раздел «Механические процессы», Приднестровский государственный университет им. Т.Г. Шевченко.

Рекомендовано Научно-методическим Советом  
ПГУим.Т.Г.Шевченко

©Составление:  
Ф.Ю.Бурменко,  
Т.В.Боунегру,  
А.П. Швец., 2016

# ВВЕДЕНИЕ

Обслуживание сложной современной техники невозможно без глубоких знаний теоретических основ процессов и основ работы оборудования.

Курс «Процессы и аппараты пищевых производств» предусматривает глубокое изучение студентами теории процессов, машин и аппаратов, принципов действия технологического оборудования, приобретения необходимых навыков по его эксплуатации и расчетам.

Производство пищевых продуктов, требует активного внедрения новейшей техники, и технологии, применение автоматизации и регулирования процессов. Все это предусматривает создание и освоение новой техники, но чем сложнее техника, тем быстрее протекают в них технологические процессы, тем труднее управление ими, тем выше должен быть уровень подготовки студентов.

Это предполагает наличие у молодых специалистов не только глубоких теоретических знаний, но прочных навыков, практического опыта, в том числе и в области расчетов аппаратов и оборудования.

Такие навыки могут быть получены путем многократных упражнений в решении конкретных задач «Теория без практики мертва».

Практическое решение задач – одно из активнейших средств обучения, важнейший вид самостоятельной работы студентов и средство приближения обучения к практической жизни.

Для студентов очень важно уметь решать задачи, выполнять расчеты, так как, это необходимо для успешной работы над курсовыми и дипломными проектами и исключительно важно для успешной работы на производстве.

Совершенствование производства и изобретательство невозможно без проведения различного вида расчетов.

Расчеты – прекрасное средство меж предметной связи, так как именно при определении производительности, мощности, затрат теплоты, расхода теплоносителя, конструктивных размеров и т.д. можно связать материал по машинам и аппаратам с материалом по конкретным предметам (дисциплинам) теоретической механики, сопротивлению материалов, деталям машин, технологии теплотехнике и т.п.

В настоящем методическом пособии приведены задачи по тепловым и массообменным процессам, механическим и гидромеханическим процессам, методики рассмотрены на конкретных примерах.

Пособие базируется на учебниках и учебных пособиях, справочниках и технической литературе, предназначенной для студентов высших учебных заведений.

# ГЛАВА ПЕРВАЯ ОСНОВНЫЕ СИСТЕМЫ ЕДИНИЦ ИЗМЕРЕНИЯ И ПЕРЕВОДНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ

## Расчетные формулы

Одной из задач курса процессов и аппаратов является изучение методик расчета различных аппаратов и их конструирование. При этом приходится пользоваться различными формулами и расчетными уравнениями, в которые входят ряд величин.

Имеется два рода величин: величины, требующие указания единицы измерения –размерные; величины, требующие лишь простого арифметического подсчета(число зубьев, количество трубок, и т.п.)

Размерные величины подразделяются на основные и производные. Измерить какую-либо величину –это значит сравнить ее с величиной ей однородной, принятую за единицу измерения.

В настоящее время вводится международная система единиц (СИ), принятая XI Генеральной конференцией по мерам и весам. Ранее наиболее распространенными были четыре системы измерения : СГС, МКС, МТС, и МКГСС(техническая). В технических расчетах, главным образом, применялась система единиц МКГСС.

В системе СГС основными единицами являются: единица длины –сантиметр (см), единица массы (г), единица времени – секунда(сек). В системе МТС : единица длины –метр (м), единица массы –тонна (т), единица времени секунда(с).

Размерность величин, состоящая из основных единиц измерения, называется производной. Например размерность плотности в системе СИ записывается в виде  $\rho = \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} = \text{кг м}^{-3}$ , а силы –  $\text{кгм/сек}^2 = \text{кг м сек}^{-2}$ .

Размерность каждой физической величины можно представить в виде степенного комплекса основных единиц измерения.

Для механических процессов такими основными единицами являются: единицы длины (L), массы (M), и времени (T). Формула

размерности физических величин записывается в виде  $[A]=L^p M^q T^r$ , где L, M, T, основные единицы измерения, а p, q, r, - целые или дробные, положительные или отрицательные числа, а следовательно и нулевые; [A]-размерность искомой величины.

Если в правой части этого равенства символы заменить сокращенными обозначениями соответствующих единиц, то получим формулу размерности единицы  $[A]=m^p kg^q сек^r$ , в системе СИ.

Например, размерность силы  $[F]=kg \text{ м/сек}^2$ , т.е.  $[F] = A = kg \text{ м/сек}^2 = kg \text{ м сек}^{-2}$ ; следовательно, M=кг; L=м; T=сек; p=1; q=1;r=-2.

Размерность относительной плотности

$$[\Delta] = \frac{[\rho]}{[\rho]_в} = \frac{kg/m^3}{kg/m^3} = kg^0 m^0 = 1, \text{ где } A=1; L=м; M=кг; p=0; q=0.$$

Всякое физическое уравнение должно быть однородно относительно размерностей, т. е. члены уравнения левой и правой частей должны иметь одну и ту же размерность.

В приложение 1, 2 приведено сопоставление единиц системы СИ с единицами измерения других систем.

**Перевод численных значений физических величин из одной системы в другую. Установление соотношений между различными единицами измерений.**

Численное значение одной и той же величины может быть различно в зависимости от принятой единицы измерения. Так, например, одну и ту же длину можно записать так: 1 км=1000 м =100 000 см = 1 000 000 мм.

Пусть мы имеем какую-либо величину A, которую измеряем единицей измерения a, причем в результате измерения установлено, что величина A вмещает в себя n единиц измерения a, тогда это обстоятельство можно представить уравнением  $A = n [a]$ . Например, длина отрезка AB=10м, где n=10, AB=A, a=1м.

Если бы a=1 см, то тогда n=1000. Из этого примера видно, что сама величина A остается неизменной, но ее численное значение изменяется в зависимости от принятой единицы измерения a.

Допустим, что данную величину измерения измеряли единицей измерения  $a$ , тогда эту величину можно было записать так:

$$A_1 = n_1 [a_1],$$

Если же за единицу измерения будет принята величина  $a_2$ , то получим

$$A_2 = n_2 [a_2],$$

а так как сама величина остается неизменной, то

$$n_1 [a_1] = n_2 [a_2],$$

откуда

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{[a_2]}{[a_1]}.$$

В практике вычислений очень часто приходится производить переход из одной системы единиц измерения в другую.

Методика перевода показана на следующих примерах.

## Примеры

**Пример 1.** Размерность единицы силы в системе СИ устанавливается из второго закона механики:

$$F = ma$$

где  $m$  - масса тела;

$a$  - ускорение силы тяжести.

Размерность массы и ускорения:

$$[m] = [\text{кг}]; [a] = [\text{м/сек}^2].$$

Размерность единицы силы (ньютон):

$$[F] = [m][a] = [\text{кг}] [\text{м/сек}^2] = [\text{кг м/сек}^2] = [\text{Н}].$$

**Пример 2.** Удельный вес - вес единицы объема:

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{mg}{V} = \rho g,$$

где  $G$  - вес, Н

$V$  - объем,  $\text{м}^3$ ;

$m$  - масса, кг.

Отсюда размерность удельного веса

$$[\gamma] = \frac{[G]}{[V]} = \text{Н/м}^3.$$

Удельный вес следует вычислять по известной плотности тела с учетом фактического ускорения силы тяжести  $g$  в пункте измерения.

**Пример 3.** Относительная плотность – отношение массы данного тела к массе воды, взятой в том же объеме при ее максимальной плотности:

$$\Delta = \frac{m_T}{m_B},$$

где  $m_T$  и  $m_B$  – масса тела и воды, кг.

Величина относительного удельного веса и относительной плотности для всех систем единиц измерений остается неизменной, поэтому можно записать так:

$$\Delta = \frac{\gamma_T}{\gamma_B} = \frac{\rho_T}{\rho_B},$$

где  $\gamma_T$ ,  $\gamma_B$  – удельный вес тела и воды, н/см<sup>3</sup>;  
 $\rho_T$  и  $\rho_B$  – плотность тела и воды, кг/м<sup>3</sup>.

Необходимо помнить, что понятия удельный вес и плотность или относительный удельный вес и относительная плотность принципиально различны.

В первом случае эти величины размерные, поэтому их числовые значения зависят от единиц измерения; во втором эти величины безразмерные – это отношения величин с однородными размерностями. Действительно:

$$[\Delta] = \frac{[\gamma_T]}{[\gamma_B]} = \frac{\text{н/м}^3}{\text{н/м}^3} = 1$$

или

$$[\Delta] = \frac{[\rho_T]}{[\rho_B]} = \frac{\text{кг/м}^3}{\text{кг/м}^3} = 1,$$

так как плотность воды  $\rho_B = 1000 \text{ кг/м}^3$ , то плотность тела будет  $\rho_T = 1000 \Delta \text{ кг/м}^3$ .

В этом случае  $\Delta$  безразмерна, но размерна величина  $1000 \text{ кг/м}^3$ , так как это плотность воды.

**Пример 4.** Определить размерность коэффициента динамической вязкости  $\mu$  в системе СИ из уравнения

$$T = \mu F \frac{dW}{dn},$$

где  $T$ -сила трения, н;

$F$ -площадь соприкосновения слоев, м<sup>2</sup>;

$dW/dn$ -градиент скорости, 1/сек.

Решая уравнение относительно  $\mu$ , получим следующую размерность:

$$[\mu] = \left[ \frac{Tdn}{FdW} \right] \left[ \frac{\text{н м}}{\text{м}^2 \text{м сек}^{-1}} \right] = \left[ \frac{\text{н сек}}{\text{м}^2} \right].$$

Так как  $1\text{н}=1\left[\frac{\text{кг м}}{\text{сек}^2}\right]$ , то получим размерность  $[\mu] = \left[\frac{\text{кг м сек}}{\text{м}^2 \text{сек}^2}\right] = \left[\frac{\text{кг}}{\text{м сек}}\right]$ .

Таким образом находятся размерности и других величин в других системах единиц измерения.

**Пример 5.** Найти соотношения между единицами измерения силы в системах СИ, МКГСС и СГС.

Соотношение между единицей силы систем СИ и СГС:

$$1[\text{Н}] = 1\left[\frac{\text{кг м}}{\text{сек}^2}\right]_{\text{СИ}} = \left[\frac{1000\text{г} \cdot 100\text{см}}{\text{сек}^2}\right] = 10^5 \left[\frac{\text{г см}}{\text{сек}^2}\right] = 10^5 \text{дин.}$$

Соотношение между единицами сил в системах МКГСС и СИ:

$$1\text{кг}=9,81\text{н} \text{ или } 1\text{н}=0,102 \text{ кг}=10 \text{ дин.}$$

**Пример 6** Установить соотношения между единицами измерения коэффициента вязкости. Переход от технической системе единиц измерения МКГСС к международной системе СГС производится так:

$$1 \frac{\text{кг сек}}{\text{м}^2} = \frac{9,81 \text{ н сек}}{\text{м}^2} = \frac{9,81 \text{ кг м сек}}{\text{м}^2 \text{ сек}^2} = 9,81 \frac{\text{кг}}{\text{м сек}};$$
$$1 \frac{\text{кг сек}}{\text{м}^2} = \frac{981 \text{ 000} \cdot \text{дин} \cdot \text{сек}}{10 \text{ 000} \text{ см}^2} = 98,1 \frac{\text{г} \cdot \text{см} \cdot \text{сек}}{\text{сек}^2 \cdot \text{см}^2} = 98,1 \frac{\text{г}}{\text{см} \cdot \text{сек}}.$$

Величина  $1 \text{ дин} \cdot \text{сек}/\text{см}^2 = 1 \text{ г} \cdot \text{см}/\text{сек}$  принята за единицу динамической вязкости в системе СГС и называется пуазом; сотая часть пуаза называется сантипуазом. Таким образом, можно записать:

$$1\left[\frac{\text{кг сек}}{\text{м}^2}\right]_{\text{МКГСС}} = 9,81 \left[\frac{1\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{сек}}\right]_{\text{СИ}} = 98,1[\text{пуаз}] = 9810 [\text{сп}]_{\text{СГС}},$$

или

$$1[\text{спз}] = 10^{-3}[\text{кг}/\text{сек} \cdot \text{м}]_{\text{СИ}}.$$

**Пример 7.** Коэффициент поверхностного натяжения воды  $\sigma = 72 \text{ дин}/\text{см}$ . Найти значение коэффициента поверхностного натяжения в международной системе.

Решение. Так как  $1 \text{ дин} = 10^{-5} \text{ Н}$ , а  $1 \text{ см} = 10^{-2} \text{ м}$ , то в системе СИ получим

$$\sigma = 72 \frac{10^{-5} * \text{Н}}{10^{-2} * \text{м}} = 72 * 10^{-3} \text{ Н/м}.$$

**Пример 8.** Удельный вес спирта в системе единиц МКГСС  $\gamma = 789 \text{ кг/м}^3$  при  $20^\circ \text{С}$ .

Определить плотность спирта при той же температуре в системах МКГСС и СИ.

В системе МКГСС:

$$\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{789}{9,81} = 80,4 \text{ кгсек}^2 / \text{м}^4.$$

В системе СИ плотность численно равна удельному весу в системе МКГСС:

$$\rho_{\text{СИ}} = \gamma; \quad \rho_{\text{СИ}} = 789 \text{ кг/м}^3.$$

### Контрольные задачи

1. Определить из уравнения второго закона Ньютона размерность массы в системе МКГСС.
2. Определить размерность работы из уравнения  $A = T \Delta S$  в технической и международной системах единиц измерений, если  $\Delta S$ -путь действия силы, а  $T$ -действующая сила.
3. Определить размерность коэффициента теплопередачи из уравнения  $Q = F k \Delta t_{\text{ср}}$  в технической и международной системах единиц измерений.
4. Найти размерность силы сопротивления среды

$$R = \xi F \frac{w_0^2}{2} \rho_c,$$

где  $\xi$  - безразмерный коэффициент сопротивления;

$F$ - площадь,  $\text{м}^2$

$w_0$ -скорость осаждения,  $\text{м/сек}$  ;

$\rho_c$ -плотность среды,  $\text{кг/м}^3$ .

5. Найти размерность скорости фильтрации  $C$  в формуле

$$C = \frac{P}{\sigma \mu s},$$

где  $\sigma$ -структурное сопротивление,  $1/\text{м}^2$ ;

$P$ -разность давлений,  $\text{н}/\text{м}^2$ ;

$\mu$  -вязкость фильтра,  $\text{н мин}/\text{м}^2$ ;

$s$ -толщина осадка,  $\text{м}$ .

**6.** Проверить с помощью анализа размерностей правильность написания отдельных членов следующего уравнения:

$$\Delta P = \lambda \frac{l}{d} * \frac{W^2}{2} \rho + \xi \frac{W^2}{2} \rho \text{ н}/\text{м}^2, \text{ или } \text{кг}/\text{м}^3 \text{ м},$$

Где-длина трубки,  $\text{м}$ ;

$d$ -диаметр трубки,  $\text{м}$ ;

$\rho$  -плотность вещества,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$\lambda$  и  $\xi$  –коэффициенты трения и сопротивления, величины безразмерные.

**7.** Показать, что критерии  $Re$ ,  $Nu$ ,  $Gr$  и  $Ar$  являются безразмерными комплексами, если

$$Re = \frac{Wd}{\nu}; \quad Nu = \frac{al}{\lambda}; \quad Gr = \frac{g l^3}{\nu^2} \beta \Delta t; \quad Ar = \frac{g l^3}{\nu^2} \frac{(\rho_1 - \rho_2)}{\rho_2},$$

где  $a$ -коэффициент теплоотдачи,  $\text{Вт}/\text{м}^2 \times \text{град}$ , или  $\text{дж}/\text{сек} * \text{м}^2 * \text{град}$ ;

$\lambda$ -коэффициент теплопроводности,  $\text{Вт}/\text{м} \times \text{град}$ , или  $\text{дж}/\text{сек} \times \text{м} \times \text{град}$ ;

$\beta$ -коэффициент объемного расширения,  $1/\text{град}$ ;

$\nu$ -коэффициент вязкости,  $\text{м}^2/\text{сек}$ ;

$\Delta t$ -разность температур,  $\text{С}^0$ ;

$\rho$ - плотность,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$g$ -ускорение силы тяжести,  $\text{м}/\text{сек}^2$ .

**8.** Найти размерность коэффициента массопередачи  $K$ , выраженного через разности парциальных давлений, малярных долей и относительных весовых составов из уравнения

$$K = \frac{M}{F \Delta},$$

где  $M$ -масса вещества, перешедшего из одной фазы в другую,  $\text{кг}/\text{сек}$ ;

$F$ -поверхность соприкосновения фаз,  $\text{м}^2$ ;

$\Delta$ - движущая сила процесса массопередачи.

**9.** Кинематическая вязкость этилового спирта  $\nu = 26,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{ч}$ . Определить абсолютную вязкость в системах СИ и МКГСС, если относительная плотность спирта  $\Delta = 0,76$ .

Ответ:  $\mu_{\text{СИ}} = 5,63 \cdot 10^{-4} \text{ кг/сек} \cdot \text{м}$ ;  $\mu_{\text{МКГСС}} = 0,574 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{сек}/\text{м}^2$ .

**10.** Определить кинематическую вязкость патоки в системе СИ, если абсолютная вязкость ее  $\mu = 51 \text{ сн}$ , а относительный удельный вес  $\Delta = 1,4$ .

Ответ:  $\nu_{\text{СИ}} = 0,0362 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{сек}$ .

**11.** Абсолютная вязкость водно-спиртовых растворов крепостью 60 мас % при  $t = 40^\circ$  равна 1,426 сн. Требуется вычислить абсолютную и кинематическую вязкости в системе СИ, если  $\rho = 874 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

Ответ:  $\nu_{\text{СИ}} = 0,00163 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{сек}$ ;  $\mu_{\text{СИ}} = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/сек} \cdot \text{м}$ .

**12.** Вязкость сахарной патоки 125 сн. Вычислить кинематическую вязкость в системе СИ и МКГСС, если  $\Delta = 1,450$ .

Ответ:  $\nu_{\text{СИ}} = \nu_{\text{МКГСС}} = 0,086 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{сек}$

**13.** По трубе диаметром  $d = 4$  дюйма со скоростью  $W = 120 \text{ м}/\text{мин}$  движется жидкость, удельный вес которой  $\gamma = 1,5 \text{ г}/\text{см}^3$ . Вычислить число Re, если  $\mu = 1,3 \text{ сн}$ .

Ответ:  $Re = 235\,000$ .

**14.** Найти кинематическую вязкость воды при  $t = 140^\circ$  в системах СИ и МКГСС, если абсолютная вязкость  $\mu = 20 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{сек}/\text{м}^2$ .

Ответ:  $\nu_{\text{СИ}} = \nu_{\text{МКГСС}} = 0,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{сек}$ .

**15.** По трубе диаметром 50 мм и длиной 100 м перекачивается жидкость в количестве 7,2 т/ч с удельным весом  $\gamma = 1 \text{ т}/\text{см}^3$ . Определить потерю давления на трение в системах СИ, МКГСС и СГС. Коэффициент трения  $\lambda = 0,03$ .

Ответ:  $\Delta P_{\text{СИ}} = 30\,000 \text{ н}/\text{м}^2$ ;  $\Delta P_{\text{СГС}} = 0,3 \text{ бар}$ ;  $\Delta P_{\text{МКГСС}} = 3060 \text{ кг}/\text{м}^2$ .

**16.** Плотность воды в системе СГС  $\rho = 1 \text{ г}/\text{см}^3$ . Определить удельный вес воды в системах СГС, СИ, МКГСС.

Ответ:  $\gamma_{\text{СГС}} = 981 \frac{\text{дин}}{\text{см}^3}$ ;  $\gamma_{\text{СИ}} = 9810 \frac{\text{н}}{\text{м}^3}$ ;  $\gamma_{\text{МКГСС}} = 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

**17.** Определить тепловую нагрузку теплообменника в системе СИ для нагревания жидкости в количестве  $G=10\ 000$  кг/ч от  $t_{\text{н}}=50$  до  $t_{\text{к}}=100^{\circ}\text{C}$ ,

если теплоемкость жидкости  $c = 0,9$  ккал/кг град.

Ответ:  $Q=523\ 10^3$  дж/сек.

## ГЛАВА ВТОРАЯ ТЕОРИЯ ПОДОБИЯ

### Расчетные формулы

В настоящей главе приведены примеры и задачи, которые способствуют усвоению основных практических приемов, вытекающих из теории подобия и встречающихся в производственной работе инженера пищевой промышленности. К этим приемам относятся:

- 1) вывод критериев подобия из физического уравнения конкретного процесса;
- 2) обработка результатов опытов в критериальной форме;
- 3) методика анализа данных для моделирования процесса.

Перед изучением и решением задач необходимо по учебнику усвоить сущность трех основных теорем подобия, метода анализа размерностей и теоремы о числе критериев подобия.

**Пример 1.** Вывести критерии подобия из уравнения истечения идеальной жидкости через отверстие в дне сосуда

$$\omega = \sqrt{2gH} \text{ м/сек}, \quad (2-1)$$

где-скорость истечения, м/сек;

$H$ -статический напор в отверстии, м;

$g$ - ускорение силы тяжести, м/сек<sup>2</sup>.

Решение. В уравнении три размерных физических величин – ( $\omega, g$  и  $H$ ) при двух основных размерностях (м, сек). Число критериев  $\pi = 3 - 2 = 1$ . Это должен быть критерий –комплекс, так как число пар одноименных величин равно нулю.

Найдем критерий двумя способами:

а) напишем уравнение (2-1) для двух подобных процессов:

$$\omega_1^2 = 2g_1H_1; \quad (2-2)$$

$$\omega_2^2 = 2g_2H_2. \quad (2-3)$$

Константы подобия:

$$C_\omega = \frac{\omega_1}{\omega_2}; \quad C_g = \frac{g_1}{g_2}; \quad C_l = \frac{H_1}{H_2};$$

отсюда

$$\omega_1 = C_\omega \omega_2; \quad g_1 = C_g g_2; \quad H_1 = C_l H_2.$$

Подставляем значения этих величин в уравнение (2-2):

$$C_{\omega}^2 \omega_2^2 = 2C_g C_l g_2 H_2. \quad (2-4)$$

Уравнение (2-4) должно тождественно совпадать с уравнением (2-3), что возможно при условии  $C_{\omega}^2 = C_g C_l$ .

Следовательно, индикатор подобия

$$J = \frac{C_{\omega}^2}{C_g C_l} = 1$$

и критерий подобия – это критерий Фруда

$$Fr = \frac{\omega^2}{gH};$$

б) разделим почленно уравнение (2-2) на уравнение (2-3):

$$\frac{\omega_1^2}{\omega_2^2} = \frac{g_1 H_1}{g_2 H_2}. \quad (2-5)$$

Преобразуем полученный результат так, чтобы каждая часть уравнения содержала величины, относящиеся к одному и тому же процессу истечения:

$$\frac{\omega_1^2}{g_1 H_1} = \frac{\omega_2^2}{g_2 H_2} \quad (2-6)$$

Следовательно, для двух (и ряда) подобных процессов безразмерный комплекс  $\frac{\omega^2}{gH}$  сохраняет одно и то же значение:

$$Fr = \frac{\omega^2}{gH} = \text{idem}$$

Характерным линейным размером системы является постоянный уровень жидкости в сосуде над отверстием:

$$l = H.$$

**Пример 2.** На лабораторной модели теплообменника изучалось влияние скорости воздуха на теплоотдачу к наружной поверхности трубы  $d=12,5$  мм. Средняя температура воздуха при атмосферном давлении  $t_f=20^{\circ}\text{C}$ . При обработке опытных данных коэффициент теплоотдачи отнесен к средней арифметической разности температур между воздухом и стенкой. При различных скоростях воздуха получены следующие значения коэффициентов теплоотдачи:

$\omega$ , м/сек	$a$ , Вт/м <sup>2</sup> град
2,0	50,1
3,1	68,5
4,8	90,0
9,0	139,0

Результаты опытов представить в критериальной форме.

Решение. Для воздуха число Прандля при различных температурах практически не изменяется ( $Pr = \text{const}$ ). Поэтому результаты опытов следует представить в виде формулы

$$Nu = C Re^n, \quad (2-7)$$

где  $C$  и  $n$  – постоянные, определяемые при графическом изображении результатов опытов;

$Nu = \frac{a \cdot d}{\lambda}$  критерий Нусельта;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/м \* град;

$Re = \frac{\omega \cdot d}{\nu}$  - критерий Рейнольдса;

$\nu$  - коэффициент кинематической вязкости воздуха, м<sup>2</sup>/сек.

В приложении 5 находим численные

значения физических параметров

воздуха при 20°C:  $\lambda = 0,0223$

ккал/м \* ч град = 0,0223 \*

1,163 Вт/м \* град = 0,026 Вт/м \* град;

$\nu = 15,06 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/сек.

Пересчитываем численные значения размерных величин в безразмерные, по соотношениям:

$$Nu = \frac{a \cdot d}{\lambda} = a \frac{0,0125}{0,026} = 0,48a;$$

$$Re = \frac{\omega \cdot d}{\nu} = \omega \frac{0,0125}{15,06 \cdot 10^{-6}} = 830 \omega.$$

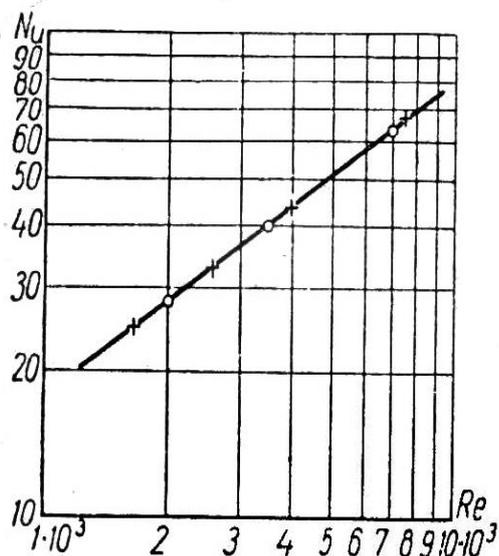


Рис. 1. График для определения констант критериального уравнения.

Результаты расчетов сводим в табл. 1.

Таблица 1

$\omega$ , м/сек	$Re$	$\alpha$ , вт/м <sup>2</sup> ·град	$Nu$
2,0	1660	50,1	24,1
3,1	2570	68,5	32,9
4,8	3980	90,0	43,2
9,0	7470	139,0	66,7

По полученным данным строим зависимость  $Nu=f(Re)$  в логарифмических координатах (рис.1). Показатель степени  $n$  численно равен тангенсу угла наклона обобщающей прямой, проведенной через опытные точки, отмеченные крестиками, т. е.  $n=0,648$ .

Постоянная  $C$  находится как средняя арифметическая для трех произвольных точек на проведенной обобщающей прямой (на графике отмечены кружками):

$$C_1 = \frac{Nu_1}{Re_1^n} = \frac{28}{2000^{0,648}} = 0,203; \quad C_2 = \frac{40}{3500^{0,648}} = 0,200;$$

$$C_3 = \frac{64}{7000^{0,648}} = 0,202;$$

$$C_1 = \frac{C_1 + C_2 + C_3}{3} = \frac{0,203 + 0,200 + 0,202}{3} = 0,201.$$

Следовательно искомое уравнение

$$Nu = 0,201 Re^{0,648}. \quad (2-8)$$

Проверим обобщение по одной из опытных точек (например, по первой точке:  $Re=1660$ ,  $Nu=24,1$ ):

Совпадение удовлетворительное (расхождение с опытом порядка 1,5%).

**Пример 3.** На опытной установке, состоящей из сменных труб длиной  $L=24\text{м}$ , определены потери давления  $\Delta p(\text{н/м}^2)$  при перекачке воды по трубам диаметром  $d_1=60\text{мм}$  и сахарного раствора (сиропа) по трубе диаметром  $d_2=100\text{мм}$ . Значение потерь давления при различных скоростях движения  $\omega(\text{м/сек})$  воды и сиропа даны в таб. 2.

**Таблица 2**

Жидкость	$\omega$ , м/сек	$\omega^2$ , м/сек	$\Delta p$ , н/м <sup>2</sup>	$\lambda$	$Re$
Вода	0,11	0,0121	105	0,043	6 600
	0,16	0,0256	201	0,039	9 600
	0,22	0,0484	338	0,035	13 200
	0,26	0,0676	457	0,034	15 600
Сироп	0,35	0,123	103	0,053	3 240
	0,49	0,240	175	0,046	4 530
	0,63	0,395	275	0,044	5 830
	0,77	0,592	394	0,042	7 140
	0,94	0,880	544	0,039	8 700

Средняя температура воды  $t_{\text{ср}}=20^{\circ}\text{C}$ , сиропа -  $80^{\circ}\text{C}$ ; массовая концентрация сухих веществ в сиропе 70%.

Требуется вывести обобщенную критериальную формулу для коэффициента трения в трубах в виде функции  $\lambda = f(Re)$ , где  $Re$  - критерий Рейнольдса.

Решение. Как известно из гидравлики, перепад давления в прямой

трубе 
$$\Delta p = \lambda \frac{L}{d} \frac{\omega^2 \rho}{2} \text{ н/м}^2, \quad (2-9)$$

где  $\rho$  - плотность жидкости,  $\text{кг/м}^3$ .

При постоянных значениях  $L$ ,  $d$  и  $\rho$  безразмерный коэффициент трения  $\lambda$  может быть рассчитан для каждой пары опытных значений  $\omega$  и  $\Delta p$  по формуле

$$\lambda = \frac{\Delta p 2d}{L \rho \omega^2} = \frac{\Delta p}{A \omega^2}, \quad (2-10)$$

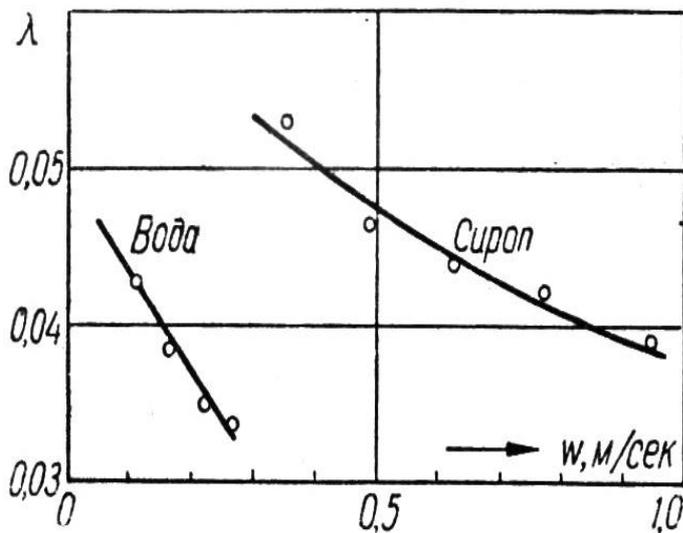


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения от скорости потока.

коэффициент кинематической вязкости  $\nu = 1,006 \cdot 10^{-6} \approx 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{сек}$ ;

$$A = \frac{L\rho}{2d_1} = \frac{24 \cdot 1000}{2 \cdot 0,6} = 200 \text{ 000 кг/м}^3.$$

Для сиропа с концентрацией СВ=70% при температуре  $80^\circ$  плотность  $\rho = 134,2 \text{ кг сек}^2/\text{м} = 9,81 \cdot 134,2 \approx 1320 \text{ кг/м}^3$ ; коэффициент кинематической вязкости  $\nu = 10,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{сек}$ ;

$$A = \frac{L\rho}{2d_1} = \frac{24 \cdot 1320}{2 \cdot 0,1} = 15850 \text{ кг/м}^3.$$

Предварительно вычислив  $\omega^2$  (таб. 2), по формуле (2-10) найти значения  $\lambda$  для каждой пары значений  $\omega$  и  $\Delta\rho$  и запишем их в таблицу. Результаты расчета в виде зависимости  $\lambda = f(\omega)$  показаны на рис. 2. Через опытные точки для каждой жидкости можно провести самостоятельную обобщающую кривую; опытные точки для разных жидкостей не находятся на общей кривой. Следовательно, зависимость и расчетная формула вида  $\lambda = f(\omega)$  для каждой жидкости индивидуальна, не пригодна для других жидкостей и очевидно, не является обобщающей для всех опытных данных.

где  $A = \frac{L\rho}{A\omega^2}$  - величина, постоянная для условий опытов с данной жидкостью,  $\text{кг/м}^3$ .

Вычислим значения  $A$  для воды и сиропа. По справочным таблицам приложения для воды [3] и сиропа [4] находим физические параметры рабочих сред, необходимые для расчетов.

Для воды при  $20^\circ\text{C}$  плотность  $\rho = 998, 2 \approx 1000 \text{ кг/м}^3$ ;

Обобщающая зависимость получается при переходе к безразмерным координатам. Для этого по горизонтальной оси графика надо отложить безразмерную скорость – критерий Рейнольдса  $Re = \frac{\omega \cdot d}{\nu}$ .

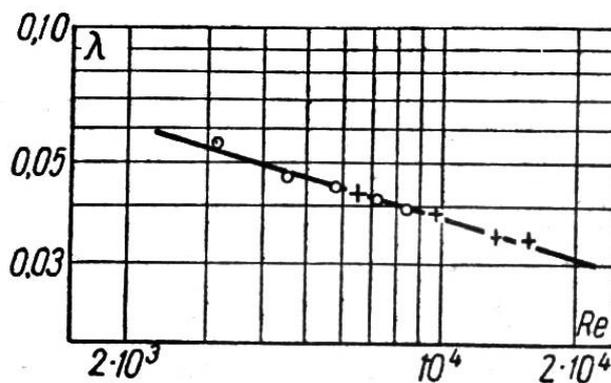


Рис. 3. Зависимость коэффициент трения от критерия Рейнольдса

По исходным данным таб. 2 о скорости рабочих жидкостей и данным о их вязкости вычисляем значения  $Re$  и сводим их в одно и ту же расчетную таблицу. Затем в логарифмических координатах (на логарифмической бумаге) наносим значения  $\lambda$ , соответствующие вычисленным значениям  $Re$  (рис. 3). Через опытные точки проводим усредняющую прямую, уравнение которой дает искомую критериальную формулу для расчета коэффициента трения в трубах. Как видим, опытные точки для различных жидкостей располагаются на общей линии. Небольшой разброс точек указывает на одинаковую относительную шероховатость обеих труб. Уравнение прямой запишем в виде

$$\lambda = C Re^n. \quad (2-11)$$

Значение  $n$  определяется тангенсом угла наклона линии на графике; в данном случае  $n = -0,286$ . Постоянная  $C$  находится для любой точки прямой; например, при  $Re = 10^4$ , поэтому  $C = \lambda Re^{0,286} = 0,037510\ 000^{0,286} = 0,525$ . Следовательно, расчетная формула будет

$$\lambda = \frac{0,525}{Re^{0,286}}. \quad (2-12)$$

Проведем ее для какой-либо точки, например для  $Re = 3 \cdot 10^3$ :

$$\lambda = \frac{0,525}{3000^{0,286}} = \frac{0,525}{9,85} = 0,0533;$$

Это значение близко к найденному по графику.

Обычно значение  $C$  определяют для нескольких точек усредняющих линии и принимают среднее арифметическое.

Данный пример наглядно демонстрирует преимущества критериального обобщения опытных данных в сравнении с эмпирическими формулами в размерной форме.

### Контрольные задачи

1. Плоская свекловичная стружка толщиной  $2\delta$  с начальным содержанием сахара  $C_0$  помещена в турбулентный поток сока с концентрацией сахара  $C_f < C_0$ , причем на поверхности стружки скачкообразно устанавливается концентрация  $C_{fw} = C_f$ . Найти в общем виде критериальное уравнение процесса экстрагирования сахара.

Ответ:  $E' = f\left(\frac{x}{\delta}, \frac{D_r}{\delta^2}\right)$ , где  $E'$  - относительная избыточная концентрация сахара в стружке;  $\frac{x}{\delta} = \Gamma$  - относительная координата рассматриваемой точки;  $\frac{D_r}{\delta^2} = F_0$  - диффузионный критерий Фурье;  $D$  - коэффициент диффузии сахара в стружке.

2. Условия предыдущей задачи изменены заданием средней концентрации сахара в соке  $C$  (кг/м<sup>3</sup>) и коэффициента массоотдачи от поверхности стружки к потоку  $\beta$  (м/сек). Найти в общем виде критериальное уравнение процесса экстрагирования.

Ответ:  $E' = f\left(\frac{x}{\delta}, \frac{D_r}{\delta^2}, \frac{\beta r}{D}\right)$ , где  $\frac{\beta r}{D} = \beta_i$  - критерий Био - соотношение внутреннего диффузионного сопротивления стружки  $\frac{\delta}{D}$  и внешнего диффузионного сопротивления  $\frac{1}{\beta}$ .

3. Вывести критерии подобия из уравнения скорости равномерного движения  $\omega = \frac{s}{r}$ .

Ответ: Критерий гомохронности  $F_0 = \frac{\omega r}{l}$ , где  $l$  - путь, м, пройденный телом за время движения  $r$ , сек.

4. Проверить, возможно ли моделировать водой процесс теплоотдачи к 50% -ному раствору глицерина при течении его в трубке натурального теплообменника диаметром 50 мм при средней температуре 20<sup>0</sup>С.

Ответ: Моделирование невозможно вследствие значения  $C_v = 7$ , что не компенсируется значениями других констант подобия.

## ГЛАВА ТРЕТЬЯ ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ

### Расчетные формулы

Основными параметрами, характеризующими работу щековой дробилки, являются: угол  $\alpha$  между щеками, называется углом захвата (рис 4), оптимальная скорость, производительность, расход энергии. Степень измельчения возрастает с увеличением угла захвата  $\alpha$ . Чтобы продукт, поступающий в дробилку, не выталкивался из нее давлением щек, угол захвата не должен превышать  $2\varphi$  – удвоенного угла трения продукта, т. е. должно соблюдаться условие  $\alpha \leq 2\varphi$ . Обычно принимают  $\alpha \leq 15 - 20^\circ$ .

Оптимальная скорость движения подвижной щеки

$$n \leq 665 \sqrt{\frac{tg \alpha}{S}} \text{ об/мин,} \quad (3-1)$$

где  $\alpha$  - угол захвата ( $\alpha=15-20^\circ$ );

$S$ -длина хода щеки, см.

Теоретическую производительность щековой дробилки при  $\alpha=22^\circ$  ( $\tan \alpha=0,4$ ) определяют по формуле  $Q = 15\mu d_{cp} S b n \rho$  т/ч, (3-2)

где  $\mu$ -коэффициент разрыхления измельченного материала ( $\mu= 0,2-0,65$ , в среднем 0,4);

$d_{cp}$ -средний диаметр кусков измельченного материала, м;

$S$ -длина хода щеки, м;

$b$ -длина впускной щеки, м;

$n$ -число оборотов приводного вала дробилки, об/мин;

$\rho$ -плотность измельченного материала, кг/м<sup>3</sup>.

Средний диаметр кусков измельченного материала

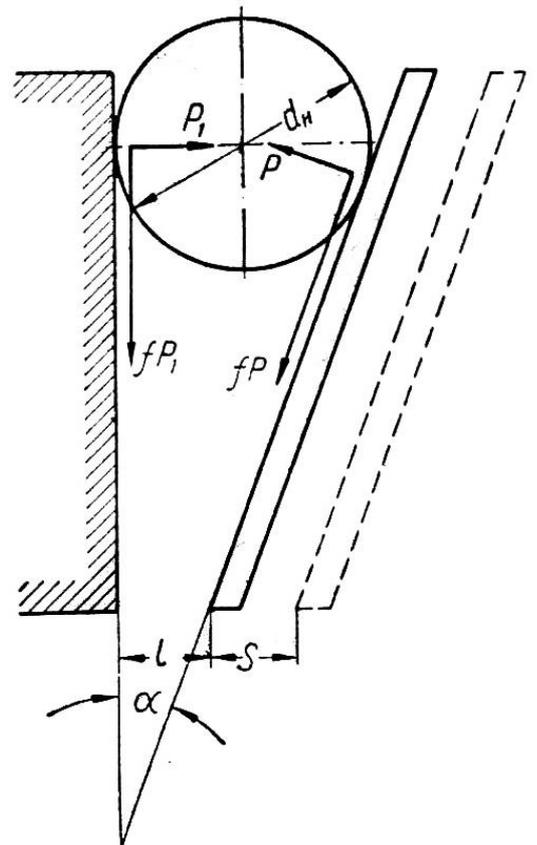


Рис. 4. К расчету щековой дробилки:

- $d_n$  — начальный диаметр кусков измельчаемого материала;
- $l$  — минимальная ширина впускной щели;
- $S$  — длина хода щеки.

$$d_{cp} = \frac{(l+S)+l}{2} = \frac{2l+S}{2},$$

где  $l$  - минимальная ширина выпускной щели.

Мощность, расходуемая на дробление в щековой дробилке, приближенно определяется по формуле (3-2)

$$N = \frac{\sigma^2 nb(d_H^2 - d_K^2)}{2340000 \cdot 10^5 E} \text{кВт}, \quad (3-3)$$

где  $\sigma$  - предел прочности измельченного материала при сжатии, Н/м<sup>2</sup>;

$n$  - число оборотов приводного вала дробилки, об/мин;

$b$  - длина выпускной щели, см;

$d_H$  и  $d_K$  - диаметры кусков начального и конечного материалов, см;

$E$  - модуль упругости первого рода, Н/м<sup>2</sup>.

Основными параметрами, характеризующими работу вальцевых дробилок, являются: угол захвата  $\alpha$  (рис. 5), скорость валков, производительность, расход энергии.

Для захвата кусков материала и измельчения его гладкими валками необходимо, чтобы угол захвата  $\alpha$  был меньше угла трения материала  $\varphi$ , т. е.  $\alpha \leq \varphi$ .

Предельное число оборотов валков  $n$  определяется из уравнения

$$N = 616 \sqrt{\frac{f}{\rho d_H D}} \text{об/мин}, \quad (3-4)$$

где  $f$  - коэффициент трения материала о валок ( $f \approx 0,2$ );

$\rho$  - плотность измельченного материала, кг/м<sup>3</sup>;

$d_H$  - диаметр кусков начального материала, м;

$D$  - диаметр вала, м.

Теоретическая производительность вальцевых дробилок

$$Q = bl \pi D n 60 \rho \varphi \frac{\text{кг}}{\text{ч}}, \quad (3-5)$$

где  $b$  - ширина щели (диаметр кусков начального материала), м;

$l$  - длина валка дробилки, м;

$D$  - диаметр вала, м;

$n$  - число оборотов приводного вала дробилки, об/мин;

$\rho$ -плотность измельченного материала, кг/м<sup>3</sup>;

$\varphi$ -поправочный коэффициент, учитывающий неравномерность питания (для зерна  $\varphi = 0,5-0,7$ ).

Мощность на валу дробилки приближенно определяют по формуле (3-2):

$$N = \frac{lDn}{35\,300} \left( \frac{d_H}{2} + \frac{D^2}{24\,000} \right) \text{кВт}, \quad (3-6)$$

где  $l$ -длина валка, см;

$D$ -диаметр валка, см;

$n$ -число оборотов валка, об/мин;

$d_H$ -диаметр кусков начального материала, см.

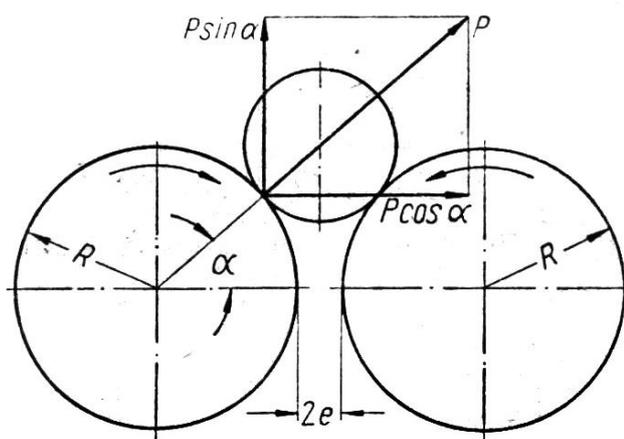


Рис. 5. К расчету вальцовой дробилки

Производительность молотковых дробилок определяют по формуле (3-2):

$$Q = \frac{\varphi D^2 b n^2}{3600(i-1)} \frac{\tau}{\text{ч}}, \quad (3-7)$$

где  $\varphi$  -опытный коэффициент, величина которого зависит от конструкции дробилки и твердости измельчаемого материала (обычно  $\varphi = 4,0 \div 6,2$ )

$d$  -диаметр ротора, м;

$b$ -ширина ротора, м;

$n$  -число оборотов ротора, об/мин;

$i$ -степень измельчения.

Мощность на валу молотковой дробилки [1] может быть приближенно определена по эмпирической формуле

$$N = (0,1 \div 0,15) i Q \text{ кВт}.$$

Основными величинами, характеризующими работу шаровой мельницы, являются: критическая скорость вращения барабана, размер шаров, производительность мельницы и расход энергии на ее вращение.

Критическое число оборотов барабана шаровой мельницы определяется по формуле

$$n_{кр} = \frac{42,4}{\sqrt{D}} \text{ об/мин}, \quad (3-8)$$

где  $D$ -диаметр барабана, м.

Обычно на выгоднейшее число оборотов мельницы принимают равным 75% от  $n_{кр}$  и определяется по формуле

$$n = \frac{32}{\sqrt{D}} \text{ об/мин}.$$

Размер шаров, загружаемых в барабан [1], определяется по формуле

$$D_{ш} = 6(\lg d_{к}) \sqrt{d_{н}} \text{ мм}, \quad (3-9)$$

где  $d_{н}$  – начальный диаметр, мм, а  $d_{к}$  – конечный диаметр дробимых кусков, мм.

Производительность мельницы ориентировочно

$$Q = kV_{б}D^{0,6} \text{ т/ч}, \quad (3-10)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности, определяемый по приведенной таблице;

Значение коэффициента  $k$

Крупность исходного материала, мм	Крупность измельченного материала, мм		
	0,2	0,15	0,075
25	1,31	0,95	0,41
19	1,57	1,09	0,51
12	1,91	1,25	0,58
6	2,4	1,5	0,66

$V_{б}$  – объем барабана, м<sup>3</sup>

$D$  – диаметр барабана, м.

Расход энергии на измельчение приближенно определяется по формуле

$$N = 6,1 m_{ш} \sqrt{D} \text{ кВт}, \quad (3-11)$$

где  $m_{ш}$  – масса шаров, т.

Содержание в материале частиц крупность меньшей, чем ука-

зано в таблице, составляет 85%.

Мощность на валу резок

$$N = \frac{S_{уд} Q f}{3600 \eta 1000} \text{ кВт}, \quad (3-12)$$

где  $S_{уд}$  - удельная работа (измельчение), Дж/см<sup>2</sup>;

$Q$  - часовая массовая производительность резки, кг;

$f$  - удельная поверхность измельчения, см<sup>2</sup>/кг;

$\eta$  - к.п.д. резки, который может быть принят равным 0,35÷0,40.

## Примеры

**Пример 1.** Определить производительность щековой дробилки для измельчения известкового камня при следующих данных:

Коэффициент разрыхления измельченного материала . . . . .	$\mu = 0,3;$
Длина хода щеки . . . . .	$S = 0,04 \text{ м};$
Длина выпускной щели . . . . .	$b = 0,4 \text{ м};$
Число оборотов вала эксцентрика (число двойных качаний щеки) . . . . .	$n = 250 \text{ об/мин};$
Плотность измельчаемого материала . . . . .	$\rho = 2300 \text{ кг/м}^3;$
Минимальная ширина выпускной щели . . . . .	$l = 0,05 \text{ м}.$

Решение. Средний диаметр кусков измельченного материала равен

$$d_{\text{ср}} = \frac{2l+S}{2} = \frac{0,1+0,04}{2} = 0,07 \text{ м}.$$

Производительность дробилки:

$$Q = 0,15 * 0,3 * 0,07 * 0,04 * 0,4 * 250 * 2300 = 29 \text{ т/ч}.$$

**Пример 2.** Определить расход энергии на дробление известнякового камня, выбрать по каталогу электродвигатель для привода дробилки при следующих данных:

Предел прочности измельчаемого материала при сжатии . . . . .	$\sigma = 900 \cdot 10^5 \text{ н/см}^2;$
Число оборотов вала эксцентрика . . . . .	$n = 250 \text{ об/мин};$
Длина выпускной щели . . . . .	$b = 40 \text{ см};$
Диаметр кусков начального материала и продуктов дробления . . . . .	$d_{\text{н}} = 25 \text{ см};$ $d_{\text{к}} = 7 \text{ см};$
Модуль упругости материала 1-го рода . . . . .	$E = 350\,000 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2.$

Решение. Мощность потребляемую дробилкой находим по формуле (3-3):

$$N = \frac{900^2 * 10^{10} * 250 * 40 (25^2 - 7^2)}{2\ 340\ 000 * 350\ 000\ 10^5 * 10^5} = 5,7 \text{ кВт.}$$

Принимаем запас мощности равным 25% , тогда мощность электродвигателя

$$N = 1,25 * 5,7 = 7,1 \text{ кВт.}$$

Передача клиноременная. Выбираем по каталогу электродвигатель в защищенном исполнении (чугунная оболочка) тип А61-6, мощностью 7 кВт с числом оборотов 1000 об/мин.

**Пример 3.** Определить теоритическую производительность вальцевой дробилки для измельчения солода при следующих данных:

Коэффициент разрыхления	измельчаемого ма	
териала	.....	$\varphi = 0,7;$
Плотность	.....	$\rho = 750 \text{ кг/м}^3;$
Диаметр валка	.....	$D = 25 \text{ см};$
Длина валка	.....	$l = 150 \text{ см};$
Диаметр (средний) измельчаемого материала	.....	$d_k = 0,2 \text{ см};$
Число оборотов валков	.....	$n = 370 \text{ об/мин.}$

Решение: Производительность вальцевой дробилки определяем по формуле (3-5):

$$Q = 2 * 10^{-3} 1,5 * 3,14 * 0,25 * 370 * 60 * 0,75 * 0,7 = 27,5 \text{ т/ч.}$$

**Пример 4.** Определить приближённо расход энергии на вальцовую дробилку, выбрать по каталогу электродвигатель для ее привода при длине валка  $l = 150$  см., диаметре валков  $D = 25$  см, числе оборотов вала  $n = 370$  об/мин, диаметре кусков начального материала  $d_n = 0,3$  см.

где  $n$ -число оборотов валка, об/мин;

$d_n$ -диаметр кусков начального материала, см.

Производительность молотковых дробилок определяют по формуле (3-2):

$$Q = \frac{\varphi D^2 b n^2}{3600(i-1)} \text{ т/ч,} \quad (3-7)$$

где  $\varphi$  -опытный коэффициент, величина которого зависит от конструкции дробилки и твердости измельчаемого материала (обычно  $\varphi=4,0\div 6,2$ );

D-диаметр ротора, м;

b-ширина ротора. м;

n-число оборотов ротора, об/мин;

i-степень измельчения.

Мощность на валу молотковой дробилки (1) может быть приближенно определена по эмпирической формуле

$$N=(0,1\div 0,15) iQ \text{ кВт.}$$

Основными величинами, характеризующими работу шаровой мельницы, являются: критическая скорость вращения барабана, размер шаров, производительность мельницы и расход энергии на ее вращение.

Критическое число оборотов барабана шаровой мельницы определяется по формуле

$$n_{\text{кр}}=\frac{42,4}{\sqrt{D}}\text{об/мин,} \quad (3-8)$$

где D-диаметр барабана, м.

Обычно найвыгоднейшее число оборотов мельницы принимают равным 75% от  $n_{\text{кр}}$  и определяют по формуле

$$n=\frac{32}{\sqrt{D}}\text{об/мин.}$$

Размер шаров, загружаемых в барабан (1), определяется по формуле

$$D_{\text{ш}}=6(\lg d_{\text{к}})\sqrt{d_{\text{н}}}\text{мм,} \quad (3-9)$$

где  $d_{\text{н}}$ -начальный диаметр, мм, а  $d_{\text{к}}$ -конечный диаметр дробимых кусков, мм. Производительность мельницы ориентировочно

$$Q=kV_{\text{б}}D^{0,6}\text{ т/ч,} \quad (3-10)$$

Принимаем  $D_{\text{ш}}=30$  мм, степень заполнения барабана шарами  $\varphi=0,4$ .

Тогда масса загружаемых шаров

$$m_{\text{ш}}=\varphi V_{\text{б}}\rho_{\text{ш}}=0,4 * 1,14 * 4100 =1870 \text{ кг.}$$

Производительность мельницы (считая на измельченный продукт) считая по формуле (3-10)

$$Q = 0,66 * 1,14 * 0,9^{0,6} \approx 0,4 \text{ т/ч.}$$

Потребляемая мощность по формуле (3-11)

$$N = 6,1 * 1,87 * \sqrt{0,9} = 10,2 \text{ кВт.}$$

**Пример 7.** Определить (приблизенно) расход энергии на измельчение свеклы в свеклорезке. Выбрать по каталогу электродвигатель для ее привода при следующих данных:

Часовая производительность резки . . . . .	$Q = 5800 \text{ кг};$
Удельная работа резания . . . . .	$S_{уд} = 0,1 \text{ дж/см}^2;$
К. п. д. резки . . . . .	$\eta = 0,4;$
Стружка пластичная . . . . .	сечение $2,8 \times 1,3 \text{ мм.}$

Решение. При плотности свеклы  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$  длина 1 кг массы стружки

$$l = \frac{1000}{0,28 * 0,13} = 36\,400 \text{ см.}$$

Стружка нарезается по трем граням. Удельная поверхность резания

$$F = 36\,000(0,28 + 2 * 0,13) = 19\,600 \text{ см}^2/\text{кг.}$$

Мощность на валу свеклорезки определяется по формуле(3-12):

$$N = \frac{0,1 * 5800 * 19600}{0,4 * 3600 * 1000} = 8 \text{ кВт.}$$

Приведенная формула является приближенной и дает заниженные результаты мощности. В свеклорезке много энергии расходуется на трение свеклы, преодоление при пуске инерции масс вращающихся частей и свеклы. Например, в существующей 12-рамной свеклорезке СЦБ-12 подобной производительности мощность установленного электродвигателя составляет 75 кВт.

### Контрольные задачи

**1.** В результате модернизации щековой дробилки число двойных качаний щеки увеличено с 250 до 300 в 1 мин. Производительность дробилки до модернизации составляла 29 т/ч. На сколько увеличится производительность дробилки.

Данные по измельчаемому материалу и дробилке следующие: коэффициент разрыхления материала  $\mu = 0,3$ , плотность  $\rho = 2300 \text{ кг/м}^3$ ,

длина хода щеки  $S=0,04$  м, минимальная ширина выпускной щели  $l=0,05$  м.

Ответ: 6 т.

2. При дроблении известкового камня расход энергии в щековой дробилке составлял 7,1 кВт при пределе прочности измельчаемого материала на сжатие  $\sigma = 900 \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup>, число оборотов вала эксцентрика  $n=250$  об/мин, длине выпускной щеки  $b=40$  см, диаметре кусков начального материала  $d_n = 0,25$  см и продуктов дробления  $d_k=7$  см, модуле упругости материала 1-го рода  $E=350\,000 \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup>. Запас мощности был принят равным 25%. Как увеличится расход энергии на дробление при измельчении нового материала с пределом прочности при сжатии  $\sigma = 12000 \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup> и модуле упругости первого рода  $E=500\,000 \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup>.

Ответ: на 1,4 кВт.

3. Определить производительность молотковой дробилки для предварительного измельчения известкового камня в сепараторном цехе сахарного завода при диаметре ротора  $D=800$  мм, его ширине  $b=600$  мм, число оборотов ротора  $n=1500$  об/мин. Средний диаметр загруженных кусков материала - 120 мм, диаметр кусков дробленного продукта - 5 мм. Опытный коэффициент  $\mu$  принять равным 0,5.

Ответ:  $Q= 5,2$  т/ч.

4. Определить расход энергии на молотковую дробилку производительностью 8 т/ч измельченного материала. Средний диаметр загружаемых кусков материала  $d_{cp}=80$  мм. диаметр кусков дробленного продукта  $d_{пр}= 5$  мм.

Ответ:  $N=19$  кВт.

5. Определить производительность и расход энергии для шаровой мельницы с диаметром барабана  $D_б=1200$  мм, его длиной  $l = 1800$  мм. 85% кусков начального материала имеют диаметр  $d_n=9$  мм, а 85% частиц измельченного продукта имеют крупность менее 50 мк. Насыпная масса стальных шариков  $\rho = 4100$  кг/м<sup>3</sup>.

Ответ:  $Q=1,5$  т/ч.

**6.** Определить (приблизительно) расход энергии на овощерезку для измельчения картофеля, моркови при ее часовой производительности  $Q=200$  кг. Удельная работа резания  $S_{уд} = 0,15$  Дж/см<sup>2</sup>. К.п.д. резки  $\eta = 0,4$ . Размер стружки -  $3 * 3$  мм.  
Ответ:  $N=2,1$  кВт.

## ГЛАВА ЧЕВЕРТАЯ ПРОСЕИВАНИЕ

### Расчетные формулы

Пропускная способность сита характеризуется его живым сечением. Живое сечение проволочных сит с квадратными отверстиями

$$\varphi = \frac{D^2}{(D+\Delta)^2} * 100\%, \quad (4-1)$$

где  $D$ - размер отверстия, мм;

$\Delta$  -толщина проволоки, мм.

Живое сечение сит из шелковых и синтетических материалов

$$\varphi = \frac{D_1 * D_2}{(D_1 + \Delta_1) * (D_2 + \Delta_2)} * 100\%, \quad (4-2)$$

где  $D_1$ - расстояние между нитями по основе, мм;

$\Delta_1$ - толщина нити по основе, мм;

$D_2$ - расстояние между нитями по утку (прямая нитка), мм;

$\Delta_2$ - толщина нити по утку, мм.

Производительность барабанного сита

$$Q = 0,72 \mu \rho_n n \tan(2a) \sqrt{R^3 h^3} \text{ т/ч}, \quad (4-3)$$

где  $\mu$  -коэффициент разрыхления материала (0,6-0,8);

$\rho_n$ -насыпная масса материала, кг/м<sup>3</sup>;

$a$ -угол наклона барабана к горизонту, град;

$h$  -высота слоя материала на сите, м.

Мощность потребляемая барабанным ситом,

$$N = \frac{R n (G_b + 13G_m)}{29200} \text{ кВт}, \quad (4-4)$$

где  $G_b$  и  $G_m$ - соответственно масса барабана и загруженного материала, кг.

Скорость вращения вала гироционного грохота (рис 6)

$$n_{\text{макс}} = \frac{30}{\sqrt{r * \tan a}} \text{ об/мин}, \quad (4-5)$$

где  $r$ - эксцентриситет, м (обычно 0,01-0,02);

$a$ -угол между пружинами 3 и вертикалью, град.

Скорость передвижения материала по ситам определяется по формуле

$$v = 0,23nrf \tan \alpha \text{ м/сек}, \quad (4-6)$$

где  $f$ -коэффициент трения материала о сито (0,3-0,4).

Обычно величина  $v$  находится в пределах 0,1-0,2 м/сек.

Производительность грохота

$$Q = 3600 Sv \rho_n \varphi \text{ кг/ч}, \quad (4-7)$$

где  $S$ -площадь сечения материала на грохоте, м<sup>2</sup>;

$\rho_n$ -насыпная масса материала (масса единицы объема сыпучего материала, ранее эта величина называлась насыпным весом) кг/м<sup>3</sup>;

$\varphi$ -коэффициент заполнения, учитывающий неполную нагрузку несущего органа материалом.

Производительность быстроходного вибрационного грохота (рис. 7) определяют по эмпирической формуле

$$Q = AF(55 + a)(60 + b)\sqrt{d} \text{ м}^3/\text{ч} \quad (4-8)$$

где  $A$ -коэффициент, равный для горизонтального грохота 0,00047, для наклонного 0,00029;

$F$ -площадь сита, м<sup>2</sup>;

$a$ -содержание нижнего продукта в исходном материале, %;

$b$ -содержание в нижнем продукте зерен размером меньше половины отверстия сита, %;

$d$ -размер отверстия, мм.

## Примеры

**Пример 1.** Определить живое сечение проволочных сит с квадратными отверстиями (ГОСТ 3826-47) Номер сит (размер стороны отверстия в мм): 10; 7; 2; 0,4, соответственно толщина проволоки: 1; 0,7; 0,6; 0,25мм.

Решение. Живое сечение сит определяется по формуле (4-1):

$$\text{Сито № 10 } \varphi = \frac{10^2}{(10+1)^2} * 100 = 82,5\%;$$

$$\text{Сито № 7 } \varphi = \frac{1^2}{(7+0,7)^2} * 100 = 83\%;$$

$$\text{Сито № 2 } \varphi = \frac{2^2}{(2+0,6)^2} * 100=59\%;$$

$$\text{Сито № 04 } \varphi = \frac{0,5^2}{(0,5+0,25)^2} * 100=44,4\%.$$

**Пример 2.** Определить живое сечение капронового сита со следующими данными: расстояние между нитями по утку  $D_1 = 0,1$  мм, толщина нити по основе  $\Delta_1 = 0,1$  мм, расстояние между нитями по утку  $D_2=0,2$  мм, толщина нитей по утку  $\Delta_2= 0,1$  мм.

Решение. Для определения живого сечения ткани применяем формулу(4-2):  $\varphi = \frac{0,1*0,2}{(0,1+0,1)*(0,2+0,1)} * 100\% = 4\%$ .

**Пример 3.** Определить число оборотов наклонного барабанного сита (грохота) при радиусе барабана  $R=0,4$  м.

Решение. Число оборотов барабанного сита

$$n = \frac{12}{\sqrt{R}} = \frac{12}{\sqrt{0,4}} = 19 \text{ об/мин.}$$

**Пример 4.** Определить производительность и расход энергии на барабанное сито для просеивания муки. Выбрать по каталогу электродвигатель для привода сита. Радиус барабана  $R=400$  мм, его длина  $l=2800$  мм. Грохот установлен под углом  $\alpha=7^\circ$  к горизонту, масса барабана  $G_б=1200$  кг, масса материала в барабане  $G_м= 50$  кг, насыпная масса материала  $\mu = 0,7$ . Число оборотов барабана  $n=19$  об/мин. Высота слоя материала на сите -50 мм.

Решение. Производительность барабанного сита определяется по формуле (4-3):

$$Q = 0,72 * 0,7 * 500 * 19 \tan(2 * 7) \sqrt{0,4^3 * 0,05^3} \cong 10,6 \text{ т/ч.}$$

Мощность, потребляемую ситом, находим по формуле (4-4):

$$N = \frac{0,4*19(1200+13*50)}{29200} = 0,48 \text{ кВт.}$$

Барабан вращается от электродвигателя с числом оборотов 1000 об/мин при передаточном числе  $i \approx 40$  через редуктор и клиноременную передачу. При к.п.д. передачи  $\eta = 0,6$  мощность электродвигателя составит  $\frac{0,48}{0,6} = 0,8$  кВт.

По каталогу выбираем электродвигатель асинхронный общего применения в защищенном исполнении (чугунная оболочка), тип А41-6;  $N=1,0$  кВт;  $n=1000$  об/мин.

### Контрольные задачи

1. Определить пригодность барабанного сита для просеивания 2,5 т/ч муки. Характеристика сита: диаметр барабана  $D=1000$  мм, число оборотов  $n=5$  об/мин, угол наклона к горизонту  $\alpha=7^\circ$ , высота слоя материала на сите  $h=0,08$  м. Насыпная масса материала  $\rho_m=500$  кг/м<sup>3</sup>, коэффициент разрыхления материала  $\mu = 0,8$ .

Ответ: 2,88 т/ч (пригодно).

2. Определить размеры плоского качающегося (гироционного) грохота для сортировки 8 т/ч материала с наибольшим размером частиц, (10 мм), насыпная масса материала  $\rho_m=1,3$  т/м<sup>3</sup>. Коэффициент трения материала о сито  $f=0,3$ . Коэффициент разрыхления материала  $\mu = 0,4$ . Диаметр отверстий сита  $d=1$  мм, угол наклона пружин грохота к вертикали  $\alpha=20^\circ$ . Эксцентриситет вала привода  $r=10$  мм. Высота слоя материала на сите 30 мм.

Ответ: 1,25\*0,7 м.

3. Определить производительность горизонтального односитного вибрационного (инерционного) грохота с размерами сита 1100\*2800 мм и размерами отверстий 5\*5 мм. Содержание нижнего продукта в исходном материале  $a=40\%$ , содержание в нижнем продукте частиц размером меньше половины отверстия сита  $b=20\%$ .

Ответ: 24,6 т/ч.

Усилие прессования определяется по формуле

$$P=0,9\rho * fH, \quad (5-1)$$

где  $\rho$  -давление прессования, н/м<sup>2</sup>;

$f$ -площадь поперечного сечения плунжера, м<sup>2</sup>;

0,9-коэффициент, учитывающий потери на трение в сальниках цилиндра и направляющих колоннах.

Для равномерной работы гидравлического пресса применяют аккумуляторы. Для грузового аккумулятора необходимый вес грузов

$$G = f_a * \rho H, \quad (5-2)$$

где  $f_a$ -площадь сечения плунжера аккумулятора, м<sup>2</sup>;

$\rho$  -давление жидкости в трубопроводе, соединенном с прессом, н/м<sup>2</sup>.

Производительность шнековых отжимающих прессов

$$Q = \frac{\pi * D^2}{4} * \frac{S * n}{60} * 3,6 \rho \mu \text{ т/ч}, \quad (5-3)$$

где  $D$ -диаметр зерного (фильтрующего) барабана в месте поступления в него массы из питателя, м;

$S$ -шаг винта, м;

$n$ -число оборотов вала в минуту, об/мин;

$\rho$ -насыпная масса материала, кг/м<sup>3</sup>;

$\mu$ -коэффициент наполнения зерного барабана (учитывая заполнение рабочего пространства барабана валом и витками шнека). Для нагнетающих шнековых формовочных прессов размер прессовой матрицы определяют из уравнения

$$Q = 3,6 * 10^3 \frac{\pi * D^2}{4} \rho \vartheta \mu \text{ кг/ч}, \quad (5-4)$$

где  $D$ -диаметр матрицы, м;

$\mu$ -коэффициент, показывающий, какую долю составляет живое сечение отверстий от общей площади матрицы ( $\mu = 0,04 \div 0,08$ );

$\vartheta$ -скорость выхода массы, м/сек;

$\rho$ -плотность формуемого материала, кг/м<sup>3</sup>.

В прессующих (брикетировочных) машинах уплотнение массы характеризуется коэффициентом прессования

$$\beta = \frac{V_1 - V_2}{V_1} * 100\%, \quad (5-5)$$

где  $V_1$ -объем массы до прессования;

$V_2$ -объем массы после прессования.

## Примеры

**Пример 1.** Определить вес грузов аккумулятора при диаметре плунжера  $D=200$  мм, давление жидкости  $\rho = 10 * 10^5$  н/м<sup>2</sup>.

Решение. Площадь сечения плунжера аккумулятора

$$f_a = \frac{\pi * 20^2}{4} = 314 \text{ см}^2 = 0,0314 \text{ м}^2.$$

Вес грузов определяем по формуле (5-2)

$$G = 314 * 100 = 31\,400 \text{ н/м}^2 \approx 3200 \text{ кг/м}^2.$$

**Пример 2.** Определить производительность шнекового пресса для отжатия воды из жома при диаметре ситчатого барабана  $D=900$  мм, шаге двухзаходного шнека в месте загрузки  $S=700$  мм, числе оборотов шнека 3 об/мин, насыпной массе жома  $\rho=900$  кг/м<sup>3</sup>, коэффициенте наполнения барабана  $\mu = 0,8$ .

Решение: Производительность пресса определяем по формуле (5-3)

$$Q = \frac{\pi * 0,9^2}{4} * \frac{0,7 * 3}{60} * 3,6 * 900 * 0,8 = 57,7 \text{ т/ч}.$$

**Пример 3.** Определить диаметр матрицы нагнетающего шнекового формовочного пресса при его производительности  $Q=1000$  кг/ч, скорости выхода массы  $\vartheta = 0,2$  м/сек, плотности формуемого материала  $\rho = 1100$  кг/м<sup>3</sup>, коэффициенте  $\mu=0,6$ .

Решение. Размер прессовой матрицы определяем из уравнения (5-4)

$$D = \sqrt{\frac{4 * 1000}{3,6 * 10^3 * 3,14 * 0,06 * 0,2 * 1100}} = 0,16 \text{ м}.$$

## Контрольные задачи

1. Определить усилие и давление прессования, производительность гидравлического пресса, применяемого в ликеро-водочной промышленности для извлечения экстрактивных веществ из дробленого сырья.

Данные по сырью и прессу:

Насыпная масса сырья..... $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ ;

Диаметр корзины..... $D = 1360 \text{ мм}$ ;

Высота..... $H = 590 \text{ мм}$ ;

Диаметр поршня ..... $d = 250 \text{ мм}$ ;

Давление в цилиндре ..... $p = 2500 \text{ н/см}^2$ ;

Коэффициент заполнения корзины. .. $\mu = 0,9$ ;

Продолжительность цикла работы пресса  $\tau = 140 \text{ мин}$ ;

Производительность пресса ..... $Q = \frac{\pi * D^2}{4} * H \rho \mu \frac{\tau}{60} \text{ кг/ч}$ ,

Ответ:  $12,3 * 10^5 \text{ н}$  ( $12,4 * 10^4 \text{ кг}$ );  $85 * 10^4 \text{ н/м}^2$  ( $86,7 * 10^3 \text{ кг/м}^2$ ,  $330 \text{ кг/ч}$ ).

2. Определить усилие и давление прессования на жмых гидравлического пресса, применяемого в маслоперерабатывающих предприятиях.

**Данные по прессу:**

Диаметр цилиндра .....  $D = 40,6 \text{ см}$ ;

Давление в цилиндре..... $p = 3000 \frac{\text{н}}{\text{см}^2}$  и  $3500 \frac{\text{н}}{\text{см}^2}$ ;

Размеры пакета жмыха..... $90 \times 35,5 \text{ см}$ .

Ответ:  $38,85 * 10^5$  и  $45,325 * 10^5 \text{ н}$ ;  $1220 * 10^4$  и  $1920 * 10^4 \text{ н/м}^2$ .

3. В результате модернизации шнекового пресса, применяемого на сахарных заводах для отжатия воды из жома, число оборотов увеличено с 3 до 5 об/мин. Производительность пресса до модернизации составляла по сырому жому  $57,7 \text{ т/ч}$ . На сколько увеличится производительность после модернизации?

**Данные по жому и прессу:**

Насыпная масса жома ..... $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ ;  
Диаметр барабана..... $D = 900 \text{ мм}$ ;  
Шаг двухзаходного шнека в месте загрузки.. $S = 700 \text{ мм}$ ;  
Коэффициент наполнения барабана..... $\mu = 0,8$ .

Ответ: на 34 т/ч.

**4.** Определить производительность шнек-пресса (экспеллера), применяемого в масложировой промышленности для отжатия масла из обжаренных подсолнечных семян.

**Техническая характеристика пресса:**

Диаметр зерного (фильтрующего) барабана в месте поступления в него массы из питателя..... $D=0,25 \text{ м}$ ;  
Шаг винта..... $S = 0,12 \text{ м}$ ;  
Число оборотов вала шнек-пресса..... $n = 20 \text{ об/мин}$ ;  
Плотность поступающей массы..... $\rho = 450 \text{ кг/м}^3$ ;  
Коэффициент наполнения зерна(заполнение рабочего пространства зерна валом и витками шнека).....  $\mu = 0,7$ .

Ответ: 2,2 т/ч.

**5.** Штемпельный пресс, применяемый на сахарных заводах, брикетует сухой жом в брикеты размером  $100 \times 30 \times 180 \text{ мм}$ . Усилие прессования перпендикулярно к стороне  $100 \times 30 \text{ мм}$ . Определить коэффициент прессования, если ход плунжера пресса составляет  $280 \text{ мм}$ .

Ответ: 38,4%.

## Оглавление

Введение	5
Глава1 Основные системы единиц измерения и переводные коэффициенты.	6
Глава 2 Теория подобия	15
Глава 3 Измельчение	23
Глава 4 Просеивание	33
Глава 5 Прессование	38

## Литература

1. Н.Г. Касаткин Основные процессы и аппараты химической технологии. Издательство :Уфа2005
2. К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков Примеры и задачи по курсу процессы и аппараты химической технологии. Издательство Химия 2007
3. Стабников В.Н., Лысянский В.М., Попов В.Д. Процессы и аппараты пищевых производств. –М.: Высшая школа 2005

Приложения

Приложение 1

Системы единиц

Физические величины и формулы	Единицы измерения систем		
	СГС	МКГСС	СИ
Площадь	см <sup>2</sup>	м <sup>2</sup>	м <sup>2</sup>
Объем	см <sup>3</sup>	м <sup>3</sup>	м <sup>3</sup>
Скорость	См/сек	м/сек	м/сек
Ускорение	См/сек <sup>2</sup>	м/сек <sup>2</sup>	м/сек <sup>2</sup>
Масса	г	кгс × сек <sup>2</sup> /м	кг
Сила	г×см/сек <sup>2</sup> =дина (дн)	кгс	кг×м/сек <sup>2</sup> = ньютон=Н
Удельный вес	г/см <sup>2</sup> × сек <sup>2</sup> = дн/см <sup>3</sup>	Кгс/см <sup>3</sup>	Кг/м <sup>2</sup> ×сек <sup>2</sup> = н/м <sup>3</sup>
Плотность	г/см <sup>3</sup>	кгс × сек <sup>2</sup> /м <sup>4</sup>	н×сек <sup>2</sup> /м <sup>4</sup> =кг/м <sup>3</sup>
Давление	г/см <sup>3</sup>	кгс × сек <sup>2</sup> /м <sup>4</sup>	н×сек <sup>2</sup> /м <sup>4</sup> =кг/м <sup>3</sup>
Коэффициент динамической вязкости	г/см×сек=пуаз(пз)	кгс×сек/м <sup>2</sup>	н×сек/м <sup>2</sup> = кг/м×сек
Коэффициент кинематической вязкости	см <sup>2</sup> /сек=стокс (ст)	м <sup>2</sup> /сек	н×м×сек/кг = м <sup>2</sup> /сек

Приложение 2

Соотношения для перевода единиц измерения из системы МКГСС в системы СГС и СИ

Физические величины	Переводные соотношения
Длина	$L_{МКГСС} = 0,01 L_{СГС} = L_{СИ}$
Площадь	$L_{МКГСС}^2 = 0,0001 L_{СГС}^2 = L_{СИ}^2$
Объем	$L_{МКГСС}^3 = 0,000001 L_{СГС}^3 = L_{СИ}^3$
Скорость	$v_{МКГСС} = 0,01 v_{СГС} = v_{СИ}$
Ускорение	$a_{МКГСС} = 0,01 a_{СГС} = a_{СИ}$
Сила	$P_{МКГСС} = 1/980700 P_{СГС} = 1/9,807 P_{СИ}$
Давление	$p_{МКГСС} = 1/98,07 p_{СГС} = 1/9,807 p_{СИ}$
Удельный вес	$\gamma_{МКГСС} = 1,02 \gamma_{СГС} = 0,102 \gamma_{СИ}$
Масса	$M_{МКГСС} = 1/9807 M_{СГС} = M_{СИ}$
Плотность	$\rho_{МКГСС} = 102 \rho_{СГС} = 0,102 \rho_{СИ}$
Коэффициент динамической вязкости	$\mu_{МКГСС} = 1/98,07 \mu_{СГС} = 1/9,807 \mu_{СИ}$
Коэффициент кинематической вязкости	$\nu_{МКГСС} = 0,0001 \nu_{СГС} = \nu_{СИ}$

## Приложение 3

### Физические свойства воды при атмосферном давлении

$t, ^\circ\text{C}$	$p \cdot 10^{-5}, \text{Па}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$h, \text{кДж/кг}$	ср. $\text{кДж/ (кг}\cdot\text{K)}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт/ (м}\cdot\text{K)}$	$a \cdot 10^8, \text{м}^2/\text{с}$	$\mu \cdot 10^6, \text{Па}\cdot\text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\beta \cdot 10^4, \text{K}^{-1}$	$\sigma \cdot 10^4, \text{Н/м}$	Pr
0	1,0133	999,9	0	4,212	56,9	13,2	1788	1,789	-0,63	756,4	13,5
10	1,0133	999,7	42,04	4,191	57,4	13,7	1306	1,306	0,7	741,6	9,52
20	1,0133	998,2	83,91	4,183	59,9	14,3	1004	1,006	1,82	726,9	7,02
30	1,0133	995,7	125,7	4,174	61,8	14,9	801,5	0,805	3,21	712,2	5,42
40	1,0133	992,2	167,5	4,174	63,5	15,3	653,3	0,659	3,87	696,5	4,31
50	1,0133	988,1	209,3	4,174	64,8	15,7	549,4	0,556	4,49	676,9	3,54
60	1,0133	983,2	251,1	4,179	65,9	16,0	469,9	0,478	5,11	662,2	2,93
70	1,0133	977,8	293,0	4,187	66,8	16,3	406,1	0,415	5,70	643,5	2,55
80	1,0133	971,8	335,0	4,195	67,4	16,6	355,1	0,365	6,32	625,9	2,21
90	1,0133	965,3	377,0	4,208	68,0	16,8	314,9	0,326	6,95	607,2	1,95

### Физические свойства воды на линии насыщения

$t, ^\circ\text{C}$	$p \cdot 10^{-5}, \text{Па}$	$\rho', \text{кг/м}^3$	$h', \text{кДж/кг}$	ср. $\text{кДж/ (кг}\cdot\text{K)}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт/ (м}\cdot\text{K)}$	$a \cdot 10^8, \text{м}^2/\text{с}$	$\mu \cdot 10^6, \text{Па}\cdot\text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\beta \cdot 10^4, \text{K}^{-1}$	$\sigma \cdot 10^4, \text{Н/м}$	Pr
100	1,0133	958,4	419,1	4,220	68,3	16,9	282,5	0,295	7,52	588,6	1,75
110	1,4326	951,0	461,4	4,233	68,5	17,0	259,0	0,272	8,08	569,0	1,60
120	1,9854	943,1	503,7	4,250	68,6	17,1	237,4	0,252	8,64	548,4	1,74
130	2,7012	934,8	546,4	4,266	68,6	17,2	217,8	0,233	9,19	528,8	1,36
140	3,6136	926,1	589,1	4,287	68,5	17,2	201,1	0,217	9,72	507,2	1,26
150	4,7597	917,0	632,2	4,313	68,4	17,3	186,4	0,203	10,3	486,6	1,17
160	6,1804	907,4	675,4	4,346	68,3	17,3	173,6	0,191	10,7	466,0	1,10
170	7,9202	897,3	719,3	4,380	67,9	17,3	162,8	0,181	11,3	443,4	1,05
180	10,027	886,9	763,3	4,417	67,4	17,2	153,0	0,173	11,9	422,8	1,00
190	12,552	876,0	807,8	4,459	67,0	17,1	144,2	0,165	12,6	400,2	0,96
200	15,551	863,0	852,5	4,505	66,3	17,0	136,4	0,158	13,3	376,7	0,93
210	19,079	852,8	897,7	4,555	65,5	16,9	130,5	0,153	14,1	354,1	0,91
220	23,201	840,3	943,7	4,614	64,5	16,6	124,6	0,148	14,8	331,6	0,89
230	27,979	827,3	990,2	4,681	63,7	16,4	119,7	0,145	15,9	310,0	0,88
240	33,480	813,6	1037,5	4,766	62,8	16,2	114,8	0,141	16,8	285,5	0,87
250	39,776	799,0	1085,7	4,844	61,8	15,9	109,9	0,137	18,1	261,9	0,86
260	46,940	784,0	1135,1	4,949	60,5	15,6	105,9	0,135	19,1	237,4	0,87
270	55,051	767,9	1185,3	5,070	59,0	15,1	102,0	0,133	21,6	214,8	0,88
280	64,191	750,7	1236,8	5,230	57,4	14,6	98,1	0,131	23,7	191,3	0,90
290	74,448	732,3	1290,0	5,485	55,8	13,9	94,2	0,129	26,2	168,7	0,93
300	85,917	512,5	1344,9	5,736	54,0	13,2	91,2	0,128	29,2	144,2	0,97
310	98,697	691,1	1402,2	6,071	52,3	12,5	88,3	0,128	32,9	120,7	1,03
320	112,90	667,1	1462,1	6,574	50,6	11,5	85,3	0,128	38,2	98,10	1,11
330	128,65	640,2	1526,2	7,244	48,4	10,4	81,4	0,127	43,3	76,71	1,22
340	146,08	610,1	1594,8	8,165	45,7	9,17	77,5	0,127	53,4	56,70	1,39
350	165,37	574,4	1671,4	9,504	43,0	7,88	72,6	0,126	66,8	38,16	1,60
360	186,74	528,0	1761,5	13,984	39,5	5,36	66,7	0,126	109	20,21	2,35
370	210,53	450,5	1892,5	40,321	33,7	1,86	56,9	0,126	264	4,709	6,79

ThermalInfo.ru

## Приложение 4

### Теплофизические характеристики сахарных растворов

Концентрация масс, %	t, С	$\rho$ , кг / м <sup>3</sup>	$\lambda$ , Вт/(кг К)	c, Дж/(кг К)	$\nu \times 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	Pr
20	50	1068	0,5706	3760	0,9065	6,38
	60	1063	0,5809	3775	0,7605	5,26
	70	1059	0,5893	3790	0,6420	4,37
	80	1054	0,5965	3805	0,5610	3,76
30	50	1113	0,5368	3546	1,2820	9,71
	60	1108	0,5458	3568	1,0820	7,84
	70	1103	0,5536	3591	0,9063	6,49
	80	1098	0,5604	3614	0,7750	5,48
40	50	1162	0,502	3333	2,140	16,52
	60	1157	0,510	3363	1,701	12,97
	70	1152	0,518	3393	1,389	10,48
	80	1146	0,524	3423	1,153	8,62
50	50	1215	0,468	3119	4,173	33,82
	60	1210	0,475	3157	3,148	25,30
	70	1205	0,482	3195	2,442	19,47
	80	1199	0,488	3232	1,956	15,50
65	60	1321	0,426	2847	15,14	112,0
	70	1316	0,433	2893	10,45	74,3
	80	1310	0,438	2943	7,54	51,8

## Приложение 5

**Физические параметры сухого воздуха при  $p=760$  мм рт. ст. = 98 кПа**

t, С	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	C, кДж (кг К)	$\lambda 10^2$ , Вт/(м К)	$\mu 10^6$ , Па с	Pr
-20	1.395	1,009	2,28	16,2	0,716
-10	1,342	1,009	2,36	16,7	0,712
0	1,293	1,005	2,44	17,2	0,707
10	1,247	1,005	2,51	17,6	0,705
20	1,205	1,005	2,59	18,1	0,703
30	1,165	1,005	2,67	18,6	0,701
40	1,128	1,005	2,76	19,1	0,699
50	1,093	1,005	2,83	19,6	0,698
60	1,060	1,005	2,90	20,1	0,696
70	1,029	1,009	2,96	20,6	0,694
80	1,000	1,009	3,05	21,1	0,692
90	0,972	1,009	3,13	21,5	0,690
100	0,946	1,009	3,21	21,9	0,688
120	0,898	1,009	3,34	21,9	0,688
140	0,854	1,013	3,49	23,7	0,684
160	0,815	1,017	3,64	24,5	0,682
180	0,779	1,022	3,78	25,3	0,682



