

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РФ
ФГБОУ ВПО «БРЯНСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ»

В.И. Чащинов

ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ

курс лекций

Часть I

Брянск 2012

УДК 664 (075)

ББК 34.7

Ч 30

Чащинов В.И. **ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ.**

Курс лекций по дисциплине: учебное пособие для студентов, обучающихся по программе специалистов и бакалавров инженерного факультета / В.И. Чащинов. – Брянск: Изд. Брянской ГСХА, 2012. –174с.

В учебном пособии излагаются основные сведения о процессах и аппаратах, используемых в пищевых технологиях. При этом рассматриваются физико-механические и физико-химические основы процессов, их кинетика, а также схемы оборудования, используемого в процессах переработки сельскохозяйственной продукции и пищевых производств.

Пособие состоит из двух частей, в первой из которых даны общие сведения о дисциплине, основные понятия и определения, а также рассмотрены механические и гидромеханические процессы. Вторая часть посвящена в основном тепловым и массообменным процессам.

Для студентов, обучающихся по программе специалистов и бакалавров специальностей, связанных с механизацией переработки и технологией производства продуктов питания.

Рецензент:

Купреенко А.И. – д.т.н, профессор, зав. кафедрой ТОЖиПП Брянской государственной сельскохозяйственной академии.

Рекомендовано методической комиссией инженерно-технологического факультета Брянской государственной сельскохозяйственной академии для студентов очного и заочного обучения направлений 110800, 260800 и 15100, протокол № 10 от 19 июня 2012 г.

© Брянская ГСХА, 2012

© Чащинов В.И., 2012

Предисловие

Предлагаемый курс лекций по дисциплине «Процессы и аппараты» рассчитан на его использование как учебно-методического пособия при подготовке как специалистов так и бакалавров по направлениям, связанным с переработкой сельскохозяйственной продукции.

В зависимости от уровня подготовки отдельные разделы изложенного материала могут использоваться либо не в полном объеме, либо дополняться преподавателем во время аудиторных занятий или проработкой соответствующей учебной литературы.

В пособии в довольно сжатом виде изложены основные сведения о процессах, использующихся в самых различных технологиях переработки продукции сельского хозяйства и производства пищевых продуктов, а также о технологических машинах и аппаратах для их осуществления. Поскольку изучение дисциплины «Процессы и аппараты» предполагает знание основ гидравлики и теплотехники в пособии приводятся минимально необходимые сведения по этим предметам.

Автор надеется, что предлагаемое пособие окажется полезным для самостоятельной работы по освоению курса студентам очной формы обучения, так и для изучения дисциплины «Процессы и аппараты» студентами-заочниками.

Введение

Процессы и аппараты – специальная дисциплина, которая является базовой для освоения целого ряда технологических дисциплин, связанных с переработкой сельскохозяйственной продукции. Знание дисциплины дает основу для разработки и совершенствования процессов в пищевой технологии, а также позволяет осуществлять рациональный выбор технологического оборудования, производить расчет и разработку технологических аппаратов.

Цель дисциплины – дать знания основных закономерностей, принципов технической реализации и методов расчета оптимальных режимов процессов в технологии переработки сельхозпродукции.

В результате изучения дисциплины студенты должны:

- **иметь представление** об основных закономерностях протекания и принципах реализации процессов в производствах пищевых отраслей, методах, применяемых при исследовании и разработке технологических процессов;
- **знать** сущность и назначение механических, гидромеханических, тепловых и массообменных процессов; основные факторы, влияющие на их движущую силу; методы расчета и подбора технологических аппаратов;
- **уметь** применять теоретические знания и практические навыки для расчета процессов и аппаратов пищевых производств.

Изучение дисциплины «Процессы и аппараты» предполагает знание определенных разделов математики, физики, химии, гидравлики и теплотехники. Теоретическим фундаментом науки о процессах и аппаратах пищевых производств являются следующие законы:

- закон сохранения массы, энергии и импульса, ко-

торые в расчетах приобретают форму уравнений баланса (например, материального и теплового);

- законы термодинамического равновесия, которые определяют направление течения процессов и позволяют определять величину движущей силы в процессах;
- законы переноса массы, энергии и импульса и кинетики процессов, которые определяют скорость протекания процессов.

При изучении процессов переработки используются как аналитические, так и экспериментальные методы, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки.

Учитывая сложность явлений, имеющих место в процессах переработки, при исследовании процессов и аппаратов широкое применение находит теория подобия. В основе теории подобия лежит объединение экспериментального и аналитического методов исследования.

Использование теории подобия позволяет представить в обобщенном виде экспериментальные зависимости, полученные для каких-то конкретных условий и распространить их на другие подобные. Подобие устанавливается по равенству определенных безразмерных чисел или критериев. Критерии подобия с физической точки зрения выражают соотношения между различными физическими эффектами, определяющими исследуемый процесс. Критерии (числа) подобия состояются из определенных величин на основании анализа дифференциальных уравнений математической физики, описывающих рассматриваемые явления. Эти безразмерные комплексы связаны критериальными уравнениями, конкретный вид которых зависит от исследуемых процессов. При этом все критерии подобия можно разделить на определяемые, к которым отно-

ются критерии, содержащие искомую величину и определяющие, которые составлены из величин, заданных при математическом описании процессов.

При рассмотрении явлений и процессов различают подобию: геометрическое, временное, физическое, подобие начальных и граничных условий. Для каждого вида подобию существуют условия или соответствующие критерии подобию.

Поскольку процессы в пищевой технологии характеризуются сложностью перерабатываемых систем, большим количеством и многообразием параметров и влияющих факторов, при их исследовании широко используются физическое и математическое моделирование. Для сокращения материальных затрат на проведение экспериментальных исследований применяются современные методы планирования эксперимента.

Наука о процессах и аппаратах является результатом упорного и длительного труда многих как отечественных, так и зарубежных учёных. У её истоков стоит выдающийся учёный химик Д.И. Менделеев, который в 1897 году в книге «Основы фабрично-заводской промышленности» изложил принципы построения курсов процессов и аппаратов и дал классификацию процессов химической технологии. Идеи, высказанные Д.И. Менделеевым, получили развитие в работах А.К. Крупского, И.А. Тищенко и ряда других учёных. Среди них следует отметить профессора Киевского политехнического института А.А. Кирова, который в 1923 году издал курс «Аппаратура и основные процессы химической технологии» и внёс значительный вклад в теорию перегонки.

Определяющие работы в области расчета выпарных и теплообменных установок выполнены профессорами Ки-

чигиным М.А., Костенко Г.Н., в области сушки – академиком АН БССР Лыковым А.В. и профессором А.С. Гинсбургом. Существенным вкладом в изучение процессов фильтрации и центрифугирования являются работы профессора Знаменского Г.М. в области экстракции – Силина П.М., в области кристаллизации – Попова В.Д.

Из зарубежных учёных следует отметить Ричардсона, Кульсона (Англия), Илиева (Болгария), Бендека, Ласло (Венгрия), Цибровского и Зюльковского (Польша), Льюиса, Уокера, Баджера, Шервуда, Джиллэнда (США), Штейдла (Чехословакия) и др.

Из современных учёных в области пищевой технологии известны работы профессора Стабникова В.Н., Кавецкого Г.Д., Курочкина А.А. и ряда других.

Несмотря на определенные достижения в теории процессов и аппаратов, ее современное состояние еще далеко от того, чтобы вполне удовлетворять требованиям инженерной практики, и поэтому нуждается в дальнейшем развитии.

1. Общие сведения о процессах и аппаратах

1.1. Основные понятия и определения

При переработке продукции с помощью машин и аппаратов осуществляются определенные воздействия на среду (вещество, совокупность тел), находящуюся в аппарате. Эту среду в пищевой технологии называют системой.

Различают **гомогенные и гетерогенные системы**.

Под **гомогенными** понимают системы, внутри которых нет поверхностей раздела между различными по физическим свойствам частями. (Пример – однородное вещество).

Гетерогенные – это системы, состоящие из различных по своим свойствам частей, между которыми существуют поверхности раздела.

Гомогенная часть системы, отделённая от других частей системы поверхностью раздела, обладающая однородным составом, определёнными физическими свойствами, отличными от других частей системы, называется **фазой**.

Процесс – это любое изменение состояния системы во времени.

Производственный (технологический) процесс – совокупность последовательных действий, направленных на достижение определённого результата.

Совокупность производственных процессов, проводимых с целью получения из исходного сырья продукта с заданными свойствами, составляет **технологический поток** или **технологию** производства продукции.

Под технологией понимают также отрасль науки, основной задачей которой является выявление физических, химических, механических и других закономерностей с целью определения и использования на практике наиболее эффективных процессов.

Технологические процессы осуществляются с помощью машин и аппаратов.

Машина – устройство, выполняющее действия (чаще всего механические движения) для преобразования энергии, материалов и информации. Применение машин облегчает или полностью заменяет физический и умственный труд и повышает его производительность.

Технологический аппарат (аппарат) – устройство для осуществления тепловых, электрических, физико-химических и других процессов, направленных на изменение свойств или агрегатного состояния обрабатываемого продукта. Характерным признаком аппарата является наличие реакционных пространств или рабочей камеры.

1.2. Классификация основных процессов переработки сельскохозяйственной продукции и аппаратов

Всё многообразие основных процессов переработки сельскохозяйственной продукции в зависимости от закономерностей их протекания можно свести к пяти основным группам:

механические, гидромеханические, теплообменные, массообменные, биохимические.

Механические процессы – процессы чисто механического воздействия на материалы. К ним относятся процессы измельчения, классификации (фракционирования или сортирования) сыпучих материалов, прессования и некоторые другие.

Гидромеханические процессы – процессы, основой которых является движение в жидких и газообразных средах или системах. Их протекание определяется законами механики и гидромеханики. К этим процессам относятся перемешивание, фильтрование, осаждение, псевдооживление зернистого материала.

Теплообменные процессы – процессы, связанные с переносом теплоты от более нагретых тел (сред) к менее нагретым. Протекание этих процессов определяется зако-

нами термодинамики и теплопередачи. К этим процессам относятся процессы нагревания и охлаждения, пастеризация, выпаривание и т.п.

Массообменные или диффузионные процессы – процессы, связанные с переносом вещества из одной фазы (среды) в другую. Характер протекания этих процессов определяется законами массообмена. К этим процессам относятся сушка, абсорбция и десорбция, адсорбция, экстракция, растворение и кристаллизация, перегонка и ректификация и др.

Химические и биохимические процессы – процессы, связанные с изменением химического состава и свойств веществ. Скорость протекания этих процессов определяется законами химической кинетики.

По принципу организации различают **периодические, непрерывные и смешанные** процессы.

В **периодическом** процессе отдельные его стадии осуществляются в одном аппарате (машине), но в определённой последовательности.

В **непрерывном** процессе отдельные его стадии осуществляются одновременно, но в разных местах одного аппарата (машины) или в разных аппаратах.

В **смешанных** процессах отдельные стадии осуществляются периодически в машинах и аппаратах периодического действия, а другие стадии – в машинах и аппаратах непрерывного действия.

В зависимости от изменения параметров процесса во времени, процессы делятся на **установившиеся (стационарные)** и **неустановившиеся (нестационарные)**. В установившихся процессах значения параметров, характеризующих процесс постоянны во времени, а в неустановившихся – переменны и зависят не только от местоположения в аппарате, но и от времени. Периодические процессы являются нестационарными, а непрерывные – как правило, стационарными.

Периодический процесс характеризуется *периодом* $\Delta\tau > 0$ (Это время от начала загрузки сырья следующей партией) и степенью непрерывности.

Степень непрерывности представляет собой отношение продолжительности процесса τ к его периоду $\Delta\tau$ $\tau/\Delta\tau < 1$. **Продолжительность процесса** – это время, необходимое для завершения всех стадий процесса (от загрузки сырья до выгрузки готового продукта).

В непрерывных процессах исходный продукт (сырьё) поступает в аппарат потоком, то есть для них период стремится к нулю, а степень непрерывности – к бесконечности. В таких процессах в любой момент времени различные порции перерабатываемого продукта находятся на разных стадиях процесса.

Классификация аппаратов производится в зависимости от характера процессов, которые в них происходят, назначения и конструктивных особенностей.

По распределению отдельных параметров, характеризующих процесс (концентраций, температур), различают аппараты **идеального (полного) смешения, идеального вытеснения и промежуточного типа**. Такую классификацию аппаратов называют классификацией по структуре потока.

В аппаратах **идеального смешения** концентрация (температура) во всём объёме одинакова и равна концентрации (температуре) на выходе из аппарата. (Вновь поступающая порция полностью перемешивается с продуктом, находящимся в аппарате и приобретает соответствующее значение параметра).

В аппаратах **идеального вытеснения** концентрация (температура) меняется плавно от начальной до конечной от места входа продукта до места его выхода из аппарата. (Вновь поступающая порция не смешивается с продуктом находящимся в аппарате, вытесняя его).

В реальных аппаратах непрерывного действия значения параметров, характеризующих систему и процесс, изменяются не так, как в аппаратах идеального смешения и идеального вытеснения. В них нет идеального смешения среды и идеального вытеснения, а оба процесса смешения и вытеснения имеют место в определённой степени. Такие аппараты относят к *аппаратам промежуточного типа*. Обычно реальный аппарат можно представить как совокупность псевдосекций, каждая из которых представляет собой аппарат идеального смешения, и при увеличении числа псевдосекций аппарат приближается к аппарату идеального вытеснения.

Деление аппаратов по этому принципу (по структуре потока) необходимо для установления скорости протекания и продолжительности процесса. Скорость процесса зависит от движущей силы (в частности, для тепловых процессов в качестве движущей силы выступает разность температур), на величину которой влияет тип аппарата, классифицируемый по структуре потока.

В аппарате идеального вытеснения движущая сила максимальна, в аппарате идеального смешения – минимальна.

1.3. Основные параметры, характеризующие процессы и аппараты

Работа машин и аппаратов, с помощью которых осуществляются процессы, оцениваются рядом технических и технологических показателей, составляющих их техническую характеристику.

К числу основных показателей относятся:

- производительность – количество перерабатываемого сырья или изготовленной продукции в единицу времени (чаще всего в час);
- потребляемая мощность – количество расходуемой энергии в единицу времени (секунду);

- параметры режима работы (давление, температура, частота вращения и т. п.);

- габаритные размеры и масса аппарата.

Важной характеристикой аппарата является его надежность.

Определяющим технологическим показателем аппарата является производительность. В общем случае расчетная производительность определяется по формуле

$$П = \frac{G \cdot \kappa_n}{\tau_в \cdot \kappa_э} , \quad (1.1)$$

где

$П$ – расчетная производительность аппарата, кг/ч (шт./ч, м³/ч);

G – расчетное количество продукции, кг (шт., м³);

$\tau_в$ – время, за которое вырабатывается (должно вырабатываться) указанное количество продукции, ч;

κ_n – коэффициент, учитывающий возможные потери продукции ($\kappa_n > 1$);

$\kappa_э$ – коэффициент, учитывающий эксплуатационные потери времени ($\kappa_э < 1$).

При выработке штучной продукции на конвейере

$$П_{шт} = \frac{3600\omega \cdot z \cdot \varphi}{l} , \quad (1.2)$$

где

$П_{шт}$ – расчетная производительность, шт./ч ;

ω – скорость перемещения по конвейеру, м/с;

z – число параллельных рядов продукции на конвейере;

φ – коэффициент, учитывающий неравномерность поступления продуктов в технологический поток;

l – расстояние между единицами продукции на конвейере, м.

При обработке продукта сплошным потоком

$$P_V = 3600\omega \cdot f \cdot \varphi , \quad (1.3)$$

где

P_V – расчетная производительность, $m^3/ч$;

ω – скорость потока, m/c ;

f – площадь поперечного сечения потока, m^2 ;

φ – коэффициент, учитывающий неравномерность поступления продуктов в технологический поток.

1.4. Кинетика процессов переработки

Кинетика – учение о скоростях и механизмах протекания процессов. Кинетика является научной основой создания новых и совершенствования существующих процессов пищевой технологии. Знание кинетических закономерностей необходимо для расчета и проектирования технологических аппаратов.

Для основных процессов, применяемых в перерабатывающих отраслях, (за исключением механических) проявляется единая кинетическая закономерность, которая может быть сформулирована следующим образом:

– скорость процесса прямо пропорциональна движущей силе процесса и обратно пропорциональна сопротивлению.

Математическая запись единой кинетической закономерности выглядит так:

$$\omega = \frac{\Delta x}{R_x} = K_x \Delta x , \quad (1.4)$$

где

ω – скорость процесса;

Δx – движущая сила;

R_x – сопротивление протеканию процесса;

$K_x = 1/R_x$ – коэффициент скорости.

В качестве движущей силы обычно выступает разность определённых величин, называемых кинетическими потенциалами, физическая сущность которых зависит от характера процессов.

В частности, скорость протекания гидромеханических процессов, как правило, определяется скоростью движения потока среды (жидкости или газа), и для этой скорости можно написать выражение

$$\omega = \frac{\Delta p}{R_z} = K_z \Delta p , \quad (1.5)$$

где

ω – скорость потока, $м/с$;

Δp – разность давлений между сечениями потока, $Па$;

R_z – гидравлическое сопротивление, $Па \cdot с / м$;

$K_z = 1/R_z$ – гидравлическая проводимость, $м / Па \cdot с$.

Для процессов теплопередачи скорость процесса определяется плотностью теплового потока, которая находится по выражению

$$q = \frac{\Delta t}{R_t} = K_t \Delta t , \quad (1.6)$$

где

q – плотность теплового потока, $Вт/м^2$;

Δt – разность температур теплоносителей (температурный напор), $^{\circ}C$;

R_t – термическое сопротивление теплопередаче, $м^2 \cdot К / Вт$;

$K_t = 1/R_t$ – коэффициент теплопередачи, $Вт / м^2 \cdot К$.

Для процессов массопередачи скорость процесса определяется плотностью потока массы, которая находится по выражению

$$j = \frac{\Delta C}{R_f} = K_f \Delta t , \quad (1.7)$$

где

j – плотность потока массы, $кг/с \cdot м^2$;

ΔC – разность концентраций, $кг/м^3$;

R_f – сопротивление массопередаче, $с/м$;

$K_f = 1/R_f$ – коэффициент массопередачи, $м/с$.

1.5. Требования, предъявляемые к машинам и аппаратам пищевых производств

Машины и аппараты пищевых производств должны удовлетворять целому ряду технологических, эксплуатационных, эргономических, экономических и других требований. К числу основных требований можно отнести:

- высокую производительность;
- малую энергоёмкость и материалоемкость;
- высокую надежность;
- удобство в эксплуатации, техническом обслуживании и ремонте;
- обеспечение безопасности в процессе эксплуатации;
- устойчивость к коррозии;
- эстетичность.

1.6. Основные параметры, характеризующие протекание производственных процессов

Производственные процессы переработки продукции осуществляются при условиях, характеризующихся сочетанием параметров, которые и определяют режим протекания этих процессов. К числу режимных параметров обычно относятся давление, температура, расход и скорость движе-

ния среды. Для массообменных процессов важной характеристикой является концентрация распределяемого компонента (переносимого вещества) в фазе (среде).

Температура и давление наряду с удельным объемом и плотностью относятся к термодинамическим параметрам, однозначно определяющих состояние термодинамической системы (рабочего тела).

Температура характеризует степень нагретости тела или его тепловое состояние, проявляемое в интенсивности теплового движения микрочастиц, составляющих вещество. Термодинамическую температуру можно рассматривать как количественную меру интенсивности теплового движения, так как ее значение пропорционально средней кинетической энергии микрочастиц вещества, совершающих тепловое движение.

Единицей измерения термодинамической температуры T является кельвин (K) и значения термодинамической температуры исчисляются по абсолютной шкале температур (шкале Кельвина). На практике для измерения температуры чаще пользуются шкалой Цельсия с единицей измерения – градус Цельсия ($^{\circ}C$). Как единицы измерения кельвин (K) и градус Цельсия ($^{\circ}C$) между собой равны. Соотношение же между температурой T , измеренной по термодинамической температурной шкале, и температурой t по шкале Цельсия имеет вид:

$$T = t + 273,15 \text{ K.}$$

Температура оказывает существенное влияние на ряд свойств продуктов и материалов, в том числе, таких как вязкость, теплоемкость, плотность и, как следствие, влияет на скорость протекания многих процессов.

Давление p представляет собой силу, приходящуюся на единицу площади поверхности и направленную по нормали к этой поверхности.

В жидкостях и газах давление проявляется как результат совокупного действия молекул, совершающих тепловое движение. Вследствие этого, давление в любой точке пространства, заполненного жидкостью или газом, действует одинаково во всех направлениях.

Основной единицей измерения давления в СИ является паскаль – Pa (H/m^2). Паскаль – единица маленькая, поэтому на практике чаще пользуются кратными единицами: килопаскаль и мегапаскаль. Достаточно широко используются также другие единицы измерения давления.

При обработке продукта сплошным потоком или в процессах, связанных с перемещением среды, важными характеристиками являются скорость движения и расход.

Скорость движения ω представляет собой путь, проходимый в единицу времени. В качестве единицы измерения скорости обычно используется метр в секунду (m/c).

Расход – это количество продукта (среды), проходящее через какое-то сечение в единицу времени. В технологиях переработки в качестве характеристики процессов используют секундный или часовой расход. При этом различают массовый G и объемный V расход, для которых используют единицы измерения соответственно $кг/с$ ($кг/ч$) и $м^3/с$ ($м^3/ч$).

Между скоростью и расходом продукта (среды), движущейся сплошным потоком существует такая связь:

$$\omega = \frac{V}{F} \quad \text{или} \quad \omega = \frac{G}{\rho \cdot F}, \quad (1.8)$$

где

F – площадь поперечного сечения потока, $м^2$.

ρ – плотность среды, $кг/м^3$;

Концентрация компонента (распределяемого вещества) представляет собой количество данного вещества, содержащегося в единице объема среды. Понятие концен-

трации вводят для неоднородных систем (смесей). Количество вещества может измеряться массой, объемом либо количеством киломолей, поэтому концентрация может выражаться различными способами:

- массовая концентрация, $кг/м^3$;
- мольная концентрация, $кмоль/м^3$;
- объёмная концентрация, $м^3/м^3$.

В ряде случаев концентрация может выражаться долей данного вещества в смеси:

- массовая доля, $кг/кг$ смеси ;
- мольная доля, $кмоль/кмоль$ смеси ;
- объёмная доля, $м^3/м^3$ смеси .

При этом долевая концентрация обычно указывается как безразмерная величина.

Тестовые контрольные вопросы и задания

1. Что такое процесс? 2. Дайте определение технологического процесса. 3. Что такое технологический аппарат? 4. В чем состоит принципиальное отличие технологической машины от аппарата? 5. Дайте классификацию процессов переработки в зависимости от основных закономерностей их протекания. 6. Назовите виды процессов в зависимости от способа их организации. 7. Что собой представляет установившийся процесс? 8. Что собой представляет неуставившийся процесс? 9. Что такое производительность процесса, и в каких единицах она измеряется? 10. Что такое движущая сила процесса? 11. Что такое кинетика процессов? 12. Дайте формулировку единой кинетической закономерности процессов переработки. 13. Приведите математическое выражение единой кинетической закономерности процессов переработки. 14. Назовите основные требования, предъявляемые к технологическим процессам. 15. Назовите основные требования, предъявляемые к технологическим машинам и аппаратам.

2. Краткие сведения о средах в процессах переработки

2.1. Свойства материалов и продуктов

На протекание процессов переработки оказывают влияние свойства продуктов и материалов, участвующих в этих процессах. Эти свойства определяются совокупностью физико-механических, теплофизических и физико-химических характеристик или параметров. При этом большинство этих характеристик обладают лабильностью, то есть изменчивостью в связи с изменением режимных параметров, таких как температура, давление, влажность и т.п. Ниже рассматриваются наиболее важные физико-механические и теплофизические характеристики материалов и продуктов переработки.

Важнейшим параметром любого вещества является плотность.

Плотность представляет собой массу единицы объема. Плотность находят по формуле

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (2.1)$$

где

ρ – плотность, кг/м³;

m – масса вещества, кг;

V – объем, занимаемый веществом, м³.

В связи с наличием теплового расширения плотность веществ имеет некоторую зависимость от температуры. Плотность твердых веществ и жидкостей практически не зависит от давления, а для газов плотность прямо пропорциональна давлению. Значения плотности различных веществ и материалов можно найти в справочной литературе. При этом для газов обычно приводится плотность при

нормальных условиях (температура равна 0°C и давление – 760 мм рт. ст. или примерно $0,1 \text{ МПа}$). Плотность газов и паров при нормальных условиях примерно в 1000 раз меньше плотности жидкостей и твердых тел.

Плотность неоднородной смеси можно определить по формуле

$$\rho_{см} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n g_i / \rho_i} , \quad (2.2)$$

где

g_i – массовая доля i -го компонента;

ρ_i – плотность i -го компонента кг/м^3 ;

n – количество компонентов смеси.

Для сыпучих материалов и пищевых продуктов вводят понятие насыпной плотности.

Насыпная плотность – это плотность свободно насыпанного материала. Насыпная плотность сыпучего материала зависит от плотности материала частиц и объема пустот между частицами. Она определяется по формуле

$$\rho_n = \rho_q (1 - \varepsilon) , \quad (2.3)$$

где ρ_n – насыпная плотность материала, кг/м^3 ;

ρ_q – плотность материала частиц, кг/м^3 ;

ε – порозность (пористость) сыпучего материала.

При этом

$$\varepsilon = \frac{V_n}{V_n} , \quad (2.4)$$

где V_n – объем пустот, m^3 ;

V_n – объем свободно насыпанного материала, m^3 .

Для большинства сыпучих материалов порозность лежит в пределах от 0,38 до 0,42. Для идеального сыпучего материала, состоящего из одинаковых сферических частиц при свободной укладке, когда центры соприкасающихся шаров образуют куб, $\mathcal{E} = 0,477$, а при плотной укладке, когда центры соприкасающихся шаров образуют ромбоэдр, $\mathcal{E} = 0,256$.

Плотность сложных многокомпонентных пищевых продуктов рекомендуется принимать по опытным данным, приводимых в справочниках, в зависимости от их состава продуктов и их температуры.

Важной характеристикой жидкостей и газов является вязкость.

Вязкость характеризует способность текучей среды (жидкости или газа) оказывать сопротивление действию сил, вызывающих ее течение. Различают динамическую и кинематическую вязкость.

Динамическая вязкость (коэффициент динамической вязкости) представляет собой коэффициент пропорциональности в выражении напряжения сдвига при ламинарном течении ньютоновской жидкости (жидкости, подчиняющейся закону вязкого трения Ньютона):

$$\tau = -\mu \cdot \nabla \omega \quad , \quad (2.5)$$

где

τ – напряжение сдвига между слоями жидкости, Pa ;

μ – динамическая вязкость, $Pa \cdot s$;

$\nabla \omega$ – градиент скорости в направлении по нормали к направлению потока.

То есть

$$\mu = \frac{\tau}{\nabla \omega} .$$

Кинематическая вязкость связана с динамической следующим соотношением

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} , \quad (2.6)$$

где ν – кинематическая вязкость, $\text{м}^2/\text{с}$;
 μ – динамическая вязкость, $\text{Па} \cdot \text{с}$;
 ρ – плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Вязкость среды существенно зависит от температуры.

Способность жидкости к растеканию характеризуется коэффициентом поверхностного натяжения.

Коэффициент поверхностного натяжения σ ($\text{Дж}/\text{м}^2$ или $\text{Н}/\text{м}$) представляет собой величину, численно равную работе, которую необходимо затратить, чтобы при постоянной температуре увеличить на единицу площадь раздела фаз.

Большое влияние на теплообменные и массообменные процессы оказывают теплофизические характеристики материалов и продуктов. К основным теплофизическим параметрам относятся, теплоемкость, коэффициент теплопроводности и коэффициент температуропроводности.

Под **теплоемкостью** обычно понимают количество теплоты, которое нужно сообщить телу, чтобы изменить его температуру на один кельвин или $^{\circ}\text{C}$.

В практических расчетах обычно пользуются значениями **удельных теплоемкостей**. Различают удельную массовую, удельную объемную и удельную молярную (мольную) теплоемкости, то есть теплоемкости соответствующей единицы количества вещества.

Таким образом:

Удельная массовая теплоемкость c (Дж/кг К) – количество теплоты, которое нужно сообщить одному кг вещества, чтобы изменить его температуру на 1 К ($^{\circ}\text{C}$).

Удельная объемная теплоемкость c' (Дж/м³ К) – количество теплоты, которое нужно сообщить одному м³ вещества (для газов – м³, приведенного к нормальным условиям, т. е. $p = 760$ мм рт. ст. и $t = 0$ $^{\circ}\text{C}$), чтобы изменить его температуру на 1 К ($^{\circ}\text{C}$).

Удельная молярная теплоемкость μC (Дж/кмоль К) – количество теплоты, которое нужно сообщить одному киломолю вещества, чтобы изменить его температуру на 1 К ($^{\circ}\text{C}$).

Наиболее часто используется удельная массовая изобарная теплоемкость.

Удельная массовая теплоемкость смеси

$$c_{см} = \sum_{i=1}^n g_i c_i, \quad (2.7)$$

где g_i – массовая доля i -го компонента смеси;

c_i – удельная массовая теплоемкость i -го компонента смеси;

n – количество компонентов смеси.

Коэффициент теплопроводности λ (Вт/м·К) характеризует способность материала передавать теплоту за счет обмена кинетической энергией при непосредственном контакте микрочастиц, совершающих тепловое движение, и численно равен плотности теплового потока при градиенте температуры 1 К/м.

Коэффициент теплопроводности определяется опыт-

ным путем и зависит от свойств материала, температуры, давления, влажности и т. п. Его значение для различных материалов можно найти в справочной литературе

Коэффициент температуропроводности характеризует скорость изменения температуры в нестационарных процессах теплопроводности и является физическим параметром вещества

$$a = \frac{\lambda}{c_p \rho}, \text{ м}^2 / \text{с}, \quad (2.8)$$

где

c_p – удельная массовая изобарная теплоемкость, Дж / кг К;

ρ – плотность вещества, кг / м³.

Сам же процесс изменения температурного поля под действием теплового потока называют температуропроводностью.

Для многих продуктов и сырья важной характеристикой является влажность.

Состояние влажного материала оценивается такими показателями как влажность и влагосодержание.

Влажность материала W – отношение массы влаги, содержащейся в материале, к массе влажного материала (обычно выражается в процентах)

$$W = \frac{m_{\text{вл}}}{m_{\text{вл}} + m_c} \cdot 100, \quad \% \quad , \quad (2.9)$$

где

$m_{\text{вл}}$ – масса влаги;

m_c – масса сухого материала.

Влагосодержание представляет собой отношение массы влаги к массе сухого материала. Влагосодержание выражается в относительных единицах (кг/кг) – x , либо в процентах – W^c

$$x = \frac{m_{вл}}{m_c}, \quad \text{кг/кг}; \quad W^c = \frac{m_{вл}}{m_c} \cdot 100, \quad \% . \quad (2.10)$$

Между влагосодержанием и влажностью материала существует следующая зависимость:

$$W^c = \frac{W}{100 - W}, \quad \% . \quad (2.11)$$

2.2. Классификация неоднородных систем

В большинстве случаев в процессах переработки мы имеем дело с неоднородными, то есть гетерогенными системами. Различают жидкие и газообразные неоднородные системы. Неоднородная система состоит как минимум из двух фаз: дисперсной и дисперсионной. При этом дисперсная фаза, будучи в мелкокораздробленном (мелкодисперсном) состоянии, распределена внутри окружающей её фазы, которую называют внешней или дисперсионной фазой.

Ниже в таблице приведена классификация неоднородных жидких и газообразных систем. В этой таблице агрегатное состояние фазы обозначено буквами: Г – газообразное, Ж – жидкое, Т – твердое.

Примерами жидких неоднородных систем являются суспензии, эмульсии и пены, газообразных систем – пыли, дымы и туманы. Пыли, дымы и туманы объединяют общим названием – аэрозоли.

Таблица 2.1

Классификация неоднородных систем

Вид	Название	Дисперсионная фаза	Дисперсная фаза	Особенности системы
Жидкие	Суспензии	Ж	Т	Измельченные твердые частицы находятся во взвешенном состоянии в жидкости. (Ж+Т).
	Эмульсии	Ж	Ж	Состоят из нерастворимых друг в друге жидкостей, одна из которых распределена в другой в виде мелких капель. (Ж+Ж).
	Пены	Ж	Г	Системы, состоящие из жидкости и распределенных в ней пузырьков газа. (Ж+Г).
Газообразные	Пыли	Г	Т	Системы, состоящие из газа и распределенных в нем твердых частиц размером 3...70 мкм (Г+Т).
	Дымы	Г	Т	Системы, состоящие из газа и распределенных в нем твердых частиц размером 0,3...3,0 мкм, образующихся при горении (Г+Т).
	Туманы	Г	Ж	Системы, состоящие из газа и распределенных в нем капель жидкости размером 0,3...3 мкм (Г+Ж).

В зависимости от размеров твердых частиц суспензии условно подразделяют на грубые (с размером частиц

более 100 мкм), тонкие (с размером частиц 0,5...100 мкм) и коллоидные растворы (с размером частиц менее 0,1 мкм).

Для эмульсий и пен в зависимости от соотношения фаз возможен переход дисперсной фазы в дисперсионную и наоборот. Такой переход называют инверсией фаз.

Тестовые контрольные вопросы и задания

1. Что такое плотность, и какова её размерность?
2. Что такое насыпная плотность?
3. Что такое порозность?
4. Как рассчитывается насыпная плотность сыпучего материала?
5. Что такое массовая доля?
6. Как рассчитывается плотность смесей, заданных массовым составом?
7. Что такое вязкость?
8. Что собой представляет ньютоновская жидкость?
9. Как определяется напряжение сдвига между слоями ньютоновской жидкости при ее ламинарном течении.
10. Что такое динамическая вязкость, и какова её размерность?
11. Что такое кинематическая вязкость, и какова её размерность?
12. Что такое коэффициент поверхностного натяжения, и какова его размерность?
13. Что такое теплоёмкость, и какова её размерность?
14. Что такое удельная массовая теплоёмкость, и какова её размерность?
15. Что такое удельная объёмная теплоёмкость, и какова её размерность?
16. Что такое удельная мольная теплоёмкость, и какова её размерность?
17. Какова связь массовой и мольной теплоёмкостей?
18. Что такое коэффициент теплопроводности, и какова его размерность?
19. Что такое коэффициент температуропроводности, и какова его размерность?
20. Какова связь коэффициентов теплопроводности и температуропроводности?
21. Что такое влажность материала?
22. Что такое влагосодержание материала?
23. Каково соотношение между влажностью и влагосодержанием?
24. Что означает термин «лабильность характеристик материалов».

Механические процессы в переработке

Механические процессы представляют собой процессы чисто механического воздействия на системы, в ходе которых не изменяются основные свойства обрабатываемых продуктов и материалов. К основным механическим процессам относятся *измельчение, классификация или сортирование сыпучих материалов, прессование и механическое перемешивание сыпучих материалов.*

3. Измельчение

3.1. Общие сведения о процессе измельчения

Измельчение – процесс разделения твердых тел на части.

Процессы механического измельчения широко применяются в самых различных отраслях перерабатывающей промышленности: в мукомольном, мясоперерабатывающем, консервном, свеклосахарном, пивоваренном, спиртовом и других производствах.

Различают два основных вида измельчения: *дробление* и *резание*.

Дроблением называют процесс уменьшения кусков твердого материала в результате механического воздействия на них без придания частицам измельченного материала определенной формы.

Резание – это процесс измельчения, осуществляемый за счет внедрения в измельчаемый материал режущего инструмента – ножа. При резании частицам измельченного материала зачастую придается определенная форма.

3.2. Краткие сведения о дроблении

Основными способами воздействий при дроблении являются: удар, раздавливание, раскалывание, разламыва-

ние и истирание. При этом в измельчающих машинах обычно комбинируются различные виды воздействий: например, удар и истирание или раздавливание и истирание. Выбор того или иного способа воздействий зависит от свойств измельчаемого материала, размера начальных кусков и требуемой степени измельчения.

Степень измельчения является одним из основных показателей процесса измельчения, которая представляет собой отношение среднего размера кусков материала до измельчения и после него. То есть

$$i = \frac{d_n}{d_k}, \quad (3.1)$$

где d_n – средний размер кусков до измельчения;

d_k – средний размер кусков после измельчения.

В зависимости от размера кусков до и после дробления условно различают следующие виды дробления (см. таблицу).

Таблица 3.1

Вид дробления	$d_n, мм$	$d_k, мм$	i
Крупное	200...1000	40...250	3...5
Среднее	25...250	10...40	5...25
Мелкое	25...50	1...10	7,5...25
Тонкое	3...25	0,4...1	7,5...25
Коллоидное	0,1...0,2	$\leq 0,001$	100...200

Обычно размер кусков характеризуется размером отверстий сит, используемых при сортировке материала. Для современных измельчающих машин степень измельчения i колеблется от 3 до 100 и более. В качестве характерного размера может использоваться эквивалентный диаметр, который для частиц неправильной формы рассчитывается по формуле

$$d_э = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}},$$

где V – объем частицы.

Измельчение – процесс энергоемкий, и для уменьшения затрат перед измельчением материал обычно сортируют, отделяя частицы с размером равным или меньшим, чем размер конечного продукта. Кроме уменьшения энергозатрат при этом предотвращается переизмельчение, и получается более однородный по размерам частиц состав продукта.

Процесс измельчения может проводиться в *открытом* и *замкнутом* циклах.

В *открытом* цикле измельчаемый материал проходит измельчаемую машину 1 раз.

В *замкнутом* цикле после прохождения материалом измельчающей машины крупные куски возвращаются на повторное измельчение. Замкнутый цикл позволяет получать более однородный по размеру частиц конечный продукт.

Один из главных вопросов при расчете процессов измельчения является определение затрат энергии на осуществление процесса измельчения. В настоящее время признаны три основных гипотезы: поверхностная (гипотеза П. Риттингера), объемная (гипотеза Ф Кика – В.Л. Кирпичева) и объединенная гипотеза П.А. Ребиндера.

Поверхностная гипотеза исходит из того, что работа, затрачиваемая на измельчение материала пропорциональна вновь образующейся площади поверхности при его измельчении. Выражением этой гипотезы является уравнение

$$A = k_2 \Delta F , \quad (3.2)$$

где

k_2 – коэффициент пропорциональности, равный работе, затрачиваемой на образование единицы площади новой поверхности;

ΔF – приращение площади поверхности материала при измельчении.

Данная гипотеза может быть применима для процессов с большой степенью измельчения (для тонкого и сверхтонкого измельчения). При этом приближенно можно считать, что площадь вновь образованной при измельчении поверхности пропорциональна квадрату эквивалентного размера частиц измельчаемого материала d_n . В этом случае работа, затрачиваемая на дробление, может быть найдена по выражению

$$A = k_p d_n^2 , \quad (3.3)$$

где

k_p – коэффициент пропорциональности.

Объемная теория исходит из того, что работа измельчения пропорциональна объемной деформации кусков материала перед разрушением

$$A = k_1 \Delta V , \quad (3.4)$$

где

k_1 – коэффициент пропорциональности, равный работе деформирования на единицу объема материала;
 ΔV – изменение объема материала при измельчении перед его разрушением.

Использование этой гипотезы приемлемо для случаев крупного дробления с малыми степенями измельчения.

Согласно гипотезе П.А. Ребиндера затраты энергии на измельчение расходуются на объемную деформацию разрушаемых кусков и на образование новых поверхностей

$$A = k_1 \Delta V + k_2 \Delta F . \quad (3.5)$$

С учетом закона Гука, определяющем затраты энергии на деформацию, уравнение Ребиндера приобретает вид:

$$A = \frac{\sigma^2 \Delta V}{2E} + k_2 \Delta F . \quad (3.6)$$

где

σ – разрушающее напряжение сжатия для измельчаемого материала, Па;

E – модуль упругости измельчаемого материала, Па.

Необходимо отметить, что в инженерной практике обычно затраты энергии на измельчение и мощность привода дробилок определяют по эмпирическим формулам с учетом материала, степени измельчения и типа дробилки.

3.3. Общие сведения о дробилках

Машины для осуществления дробления называются дробилками. Дробилки для мелкого, тонкого и сверхтонкого дробления называют мельницами. При всем многообразии материалов и технологий, где применяются измельчающие машины, к ним предъявляется ряд общих требований:

- конечный продукт должен иметь частицы примерно равного размера;
- раздробленный материал должен бесперебойно удаляться из дробилки, чтобы избежать переизмельчения материала и уменьшить энергозатрат;
- возможность быстрой и легкой переналадки для изменения степени измельчения;
- возможность быстрой и легкой смены наиболее изнашивающихся частей (в первую очередь дробящих элементов);
- наличие предохранительных элементов, предотвращающих аварию всей конструкции при попадании особо крупных и прочных кусков;
- по возможности малое пылеобразование при измельчении сухих материалов.

Существует довольно большое количество видов дробилок, отличающихся принципом действия и основными конструктивными признаками. Основные типы дробилок с указанием их назначения приведены в таблице 3.2.

На рисунках, приведенных ниже, даны схемы некоторых типов дробилок, которые дают представление об их устройстве и принципе действия.

В приведенных дробилках измельчение происходит при комбинации различных способов воздействий на измельчаемый материал, возможно, с преобладанием одного из них. Так в щековых дробилках основной способ воздействия – раздавливание.

Таблица 3.2

Вид дробилки	Основное назначение
Щековая	Крупное и среднее дробление
Конусная (гирационная)	Крупное и среднее дробление
Вальцовая	Среднее, мелкое и тонкое дробление
Молотковая	Среднее, мелкое и тонкое дробление для хрупких и не слишком твердых материалов
Штифтовые мельницы	Мелкое и тонкое дробление (помол) для хрупких и не слишком твердых материалов
Шаровые (стержневые) мельницы	Мелкое и тонкое дробление (помол)
Вибрационные мельницы	Тонкое и сверхтонкое дробление (помол)
Мельницы с вращающимися истирающими частями	Мелкое и тонкое дробление (помол)
Струйные дробилки	Тонкое и сверхтонкое дробление
Коллоидные мельницы	Сверхтонкий помол

В гирационных дробилках наряду с раздавливанием существенную роль играет истирание.

В молотковых преобладающим воздействием является удар. При этом материал разрушается не только от удара шарнирно прикрепленных к быстровращающемуся диску молотков, но и при ударе отбрасываемых частиц о броневые плиты. Степень измельчения материала в этих дробилках зависит от размеров отверстий в колосниковых решетках.

В вальцовых дробилках (мельницах) сочетается раздавливание и истирание, а при рифленых вальцах и раскалывание.

В штифтовых мельницах (рис.3.5) на вращающихся дисках по концентрированным окружностям расположены пальцы-била. Каждый ряд пальцев одного диска расположен с небольшим зазором между двумя рядами пальцев другого диска. Машина с двумя вращающимися дисками называется дезинтегратором. В них материал поступает через загрузочный бункер и измельчается за счет ударов вращающихся пальцев. При этом может иметь место излом и истирание частиц, попадающих между двумя пальцами-билами.

Машина, в которой роль второго диска выполняет неподвижная крышка, с расположенными на ней по концентрированным окружностям пальцами, называется диссемебратором. Диссемебраторы широко применяются для измельчения пряностей и других продуктов.

Шаровые мельницы представляют собой вращающийся барабан, покрытый изнутри броневыми плитами. Барабан заполняют измельчаемым материалом вместе с шарами, изготовленными из твердого прочного материала (сталь, диабаз, фарфор и др.) Наряду с шарами используют также цилиндрические стержни. Измельчение материала происходит под действием ударов падающих шаров или

стержней и истирания между шарами и внутренней поверхностью барабана.

К мельницам с вращающимися истирающими частями относятся дисковые мельницы, жернова, бегуны и терки. Измельчение в них осуществляется за счет раздавливания и истирания материала, находящегося между неподвижной поверхностью и вращающимися истирающими элементами (диском, жерновами, катками).

В вибрационных мельницах в барабан также загружается материал вместе с измельчающими элементами, например шарами, и корпусу сообщается вибрация с определенной частотой и амплитудой колебаний. В результате ударного и истирающего воздействия измельчающих тел на материал при вибрации происходит его тонкое измельчение.

В струйных мельницах зернистый сыпучий материал струей воздуха через сопло с высокой скоростью направляется на броневую плиту, при соударении с которой и происходит измельчение материала.

Коллоидные мельницы используются для сверхтонкого измельчения, в том числе для измельчения мокрым способом, то есть измельчения суспензий. По конструкции коллоидные мельницы бывают как коническими, так и дисковыми с вертикальной осью вращения. Основной способ воздействия на материал в этих мельницах – истирание.

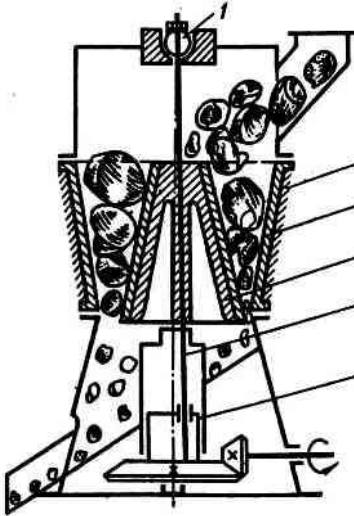


Рис. 3.1. Схема конусной (гирационной) дробилки

- 1 – шаровая опора;
- 2 – копус;
- 3 – броневая плита;
- 4 – дробящая головка;
- 5 – главный вал;
- 6 – эксцентрик

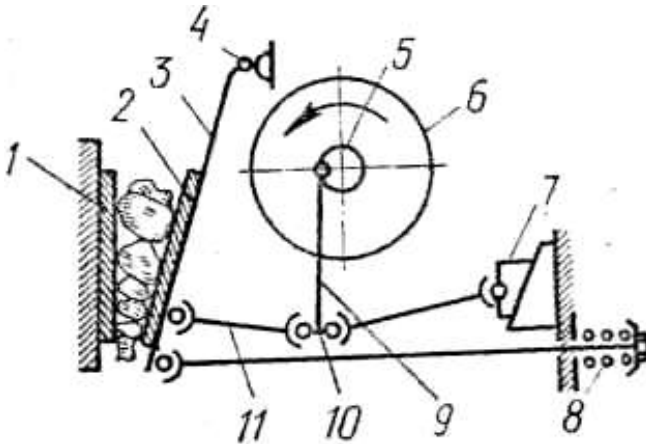


Рис.3.2. Схема щековой дробилки

- 1 – неподвижная броневая плита; 2 – подвижная броневая плита; 3 – подвижная щека; 4 – ось подвижной щеки;
- 5 – эксцентриковый вал; 6 – маховик; 7 – клин; 8 – пружина; 9 – шатун; 10 – тяга; 11 – распорные плиты

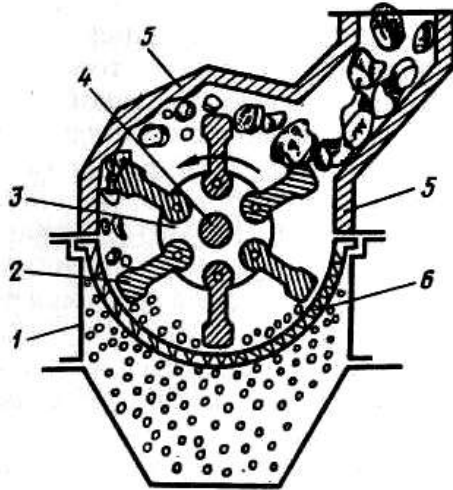


Рис. 3.3. Схема молотковой дробилки
 1 – корпус; 2 – дробящий молоток; 3 – диск; 4 – вал;
 5 – броневая плита; 6 – колосниковая решетка

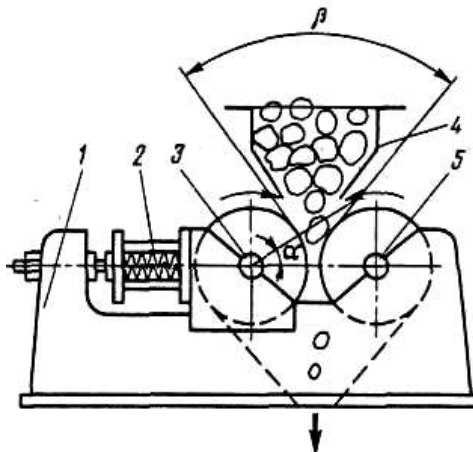


Рис. 3.4. Схема валковой дробилки (мельницы)
 1 – станина; 2 – пружина; 3 – подвижный валок;
 4 – бункер; 5 – неподвижный валок

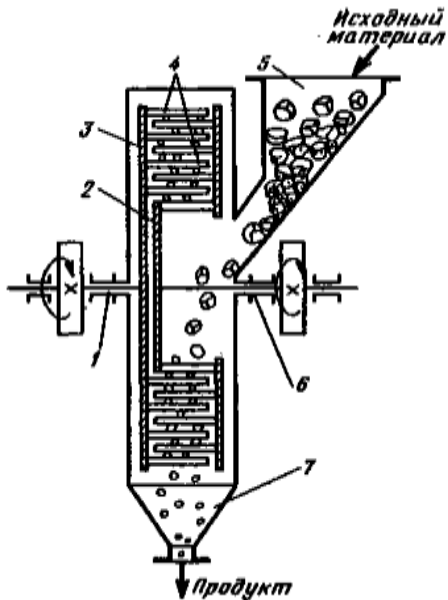


Рис. 3.5. Схема дезинтегратора

- 1, 6 – валы;
- 2, 3 – диски;
- 4 – пальцы-била;
- 5 – загрузочная воронка;
- 7 – разгрузочная воронка

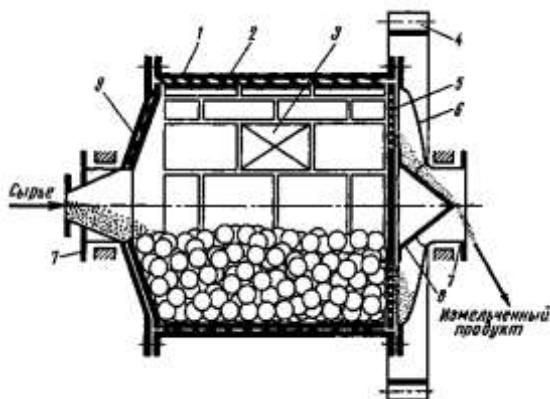


Рис. 3.6. Шаровая мельница

- 1 – корпус барабана; 2 – броневая плита; 3 – люк;
- 4 – приводная шестерня; 5 – решетка; 6 – крышка;
- 7 – полые цапфы; 8 – направляющий конус; 9 – крышка

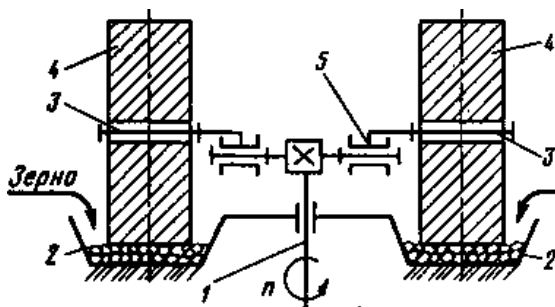


Рис. 3.7. Бегуны

1 – вертикальный вал; 2 – чаши; 3 – горизонтальные оси;
4 – жернова (катки); 5 – кривошип

3.4. Краткие сведения о резании

Резание является одним из основных технологических процессов пищевой технологии. Как уже отмечалось, при резании измельчение происходит за счет внедрения в измельчаемый материал режущего инструмента – ножа. Режущие инструменты могут иметь разнообразную конструкцию и форму: пластинчатые прямоугольные и серповидные, дисковые, роторные, ленточные, струнные и др.

При резании происходит относительное движение режущего инструмента и материала. Это относительное движение может обеспечиваться за счет перемещения ножа, за счет перемещения материала при неподвижном режущем инструменте, так и за счет перемещения и ножа и измельчаемого материала. При этом режущие инструменты могут совершать вращательное, возвратно-поступательное, плоскопараллельное, поворотное, колебательное или вибрационное движение.

Работа, затрачиваемая на резание, состоит из двух со-

ставляющих: работы, на сжатие материала под лезвием ножа и работы прорезания. Обычно работу, затрачиваемую на резание, находят по значению удельной работы (приходящейся на 1 м^2 поверхности резания), определяемой экспериментально в зависимости от материала и технологии резки. В соответствии с этим мощность на привод резательной машины (резки) находят по формуле

$$N = \frac{A_{\text{уд}} \cdot P \cdot f}{3600 \cdot 1000 \cdot \eta}, \text{ кВт}, \quad (3.7)$$

где $A_{\text{уд}}$ – удельная работа резания, $\text{Дж}/\text{м}^2$;

P – производительность резки, $\text{кг}/\text{ч}$;

f – удельная поверхность резания, $\text{м}^2/\text{кг}$;

η – КПД резки ($\eta = 0,35 \dots 0,4$) .

Значения удельной работы резания в зависимости от материала и технологии резания может колебаться в широких пределах. Так для свеклы она имеет значение $A_{\text{уд}} = 885 \dots 1580 \text{ Дж}/\text{м}^2$, для картофеля – $590 \dots 685 \text{ Дж}/\text{м}^2$, для моркови – $1380 \dots 1570 \text{ Дж}/\text{м}^2$. Удельная поверхность резания определяется расчетным путем в зависимости от режущего инструмента, формы, и размеров стружки.

3.5. Общие сведения о машинах для резания

Резательные машины (резки) в зависимости от принципа действия и конструкции режущих устройств делят следующие группы:

- центробежные (с неподвижными режущими устройствами), в которых ножевые рамы закреплены в пазах вертикального корпуса, а продукт прижимается к но-

жам за счет центробежной силы и заклинивающего действия лопастей вращающегося ротора;

- дисковые (с подвижными режущими устройствами), в которых ножи крепятся к вращающему диску, а продукт прижимается к ножам специальными прижимами и под действием собственного веса;

- барабанные (с подвижными режущими устройствами), в которых ножевые рамы крепятся в пазах стенки горизонтального вращающегося барабана, а продукт прижимается к ножам специальными устройствами;

- Комбинированные, в которых имеются две и более групп ножей, причем одна группа ножей совершает вращательное движение, а другая, как правило, неподвижна и находится в перпендикулярной плоскости.

- Ниже на рисунках представлены схемы некоторых резательных машин.

В отечественной свеклосахарной промышленности наиболее распространенными являются центробежные свеклорезки. Они позволяют заменять ножи на ходу, и достаточно просто регулировать производительность и параметры стружки. Однако эти свеклорезки сложны по конструкции и потребляют большое количество энергии.

За рубежом более широко применяют дисковые свеклорезки. В этих машинах ножи с рамами устанавливают в пазах горизонтально вращающегося диска. Свекла в них прижимается к ножам под действием собственной массы и при помощи специальных прижимов.

Дисковые свеклорезки потребляют меньше энергии по сравнению с центробежными и при хорошей очистке свеклы выдают свекловичную стружку хорошего качества. Однако смена ножей производится при остановке машины, поэтому при плохой очистке свеклы дисковые свеклорезки требуют больших эксплуатационных затрат на техническое обслуживание и ремонт.

В мясоперерабатывающей промышленности основными режущими машинами для измельчения сырья служат волчки, куттеры, мясорезательные машины и шпигорезки.

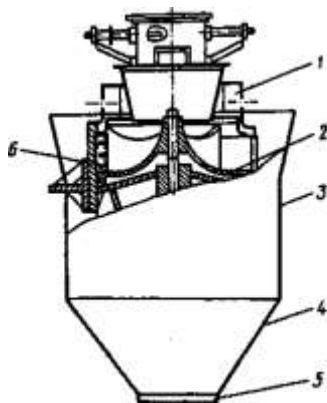


Рис. 3.8. Центробежная свеклорезка

- 1 – загрузочный бункер;
- 2 – трехлопастная улитка (ротор);
- 3 – верхний кожух;
- 4 – нижний кожух;
- 5 – люк;
- 6 – ножевые рамы

Волчек по своей конструкции напоминает бытовую мясорубку и предназначен для среднего, мелкого измельчения мясного сырья. Основными механизмами волчка являются питающий и режущий. Режущий механизм волчка обычно состоит из нескольких режущих ножей и решеток.

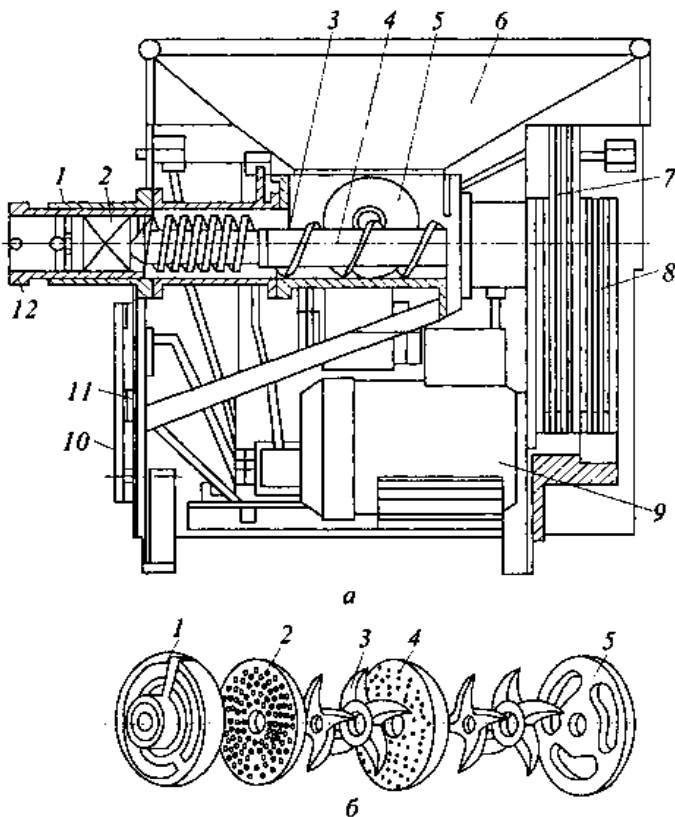


Рис. 3.9. Волчек

a – общий вид (1 – решетка; 2 – режущий механизм;
 3 – ножевой вал; 4 – шнек; 5 – одновитковая лопасть;
 6 – бункер; 7 – клиноременная передача; 8 – редуктор;
 9 – электродвигатель; 10 – площадка; 11 – желоб;
 12 – трубчатая насадка);

б – режущий механизм (1 – подпорная решетка;
 2 – ножевая решетка; 3 – нож; 4 – промежуточная решетка;
 5 – приемная решетка)

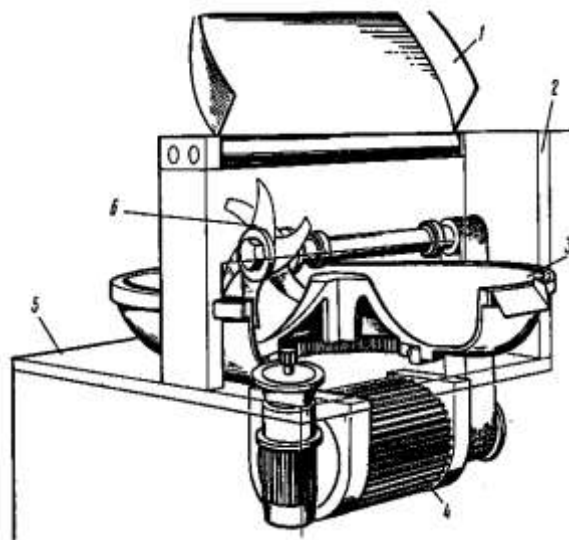


Рис. 3.10. Куттер

- 1 – крышка; 2 – стенка; 3 – чаша; 4 – привод;
5 – станина; 6 – режущий инструмент

Куттеры предназначены для тонкого измельчения мягкого мясного сырья и превращения его в однородную гомогенную массу.

В куттерах измельчение осуществляется серповидными ножами, вращающимися на горизонтальном валу. Ножи попеременно погружаются в медленно вращающуюся чашу с сырьем, и при этом наряду с измельчением осуществляется перемешивание содержимого чаши.

Механизм резания шпигорезок состоит из пластинчатых ножей, закрепленных в ножевых рамках, и серповидного ножа. Ножевые рамки совершают возвратно-поступательное движение в двух взаимно перпендикулярных направлениях одной плоскости, а располагаемый за ними серповидный нож совершает непрерывное круговое движение. Измельчаемое сырьё подается к механизму ре-

зания толкателем. При этом плоские ножирезают мясо или охлажденный шпиг в продольном направлении его подачи, а серповидный нож осуществляет поперечную резку сырья.

Для измельчения мягкого и сочного растительного сырья (некоторых видов овощей, фруктов и ягод) используются протирочные машины. Представление об устройстве протирочных машин дает рисунок 3.11.

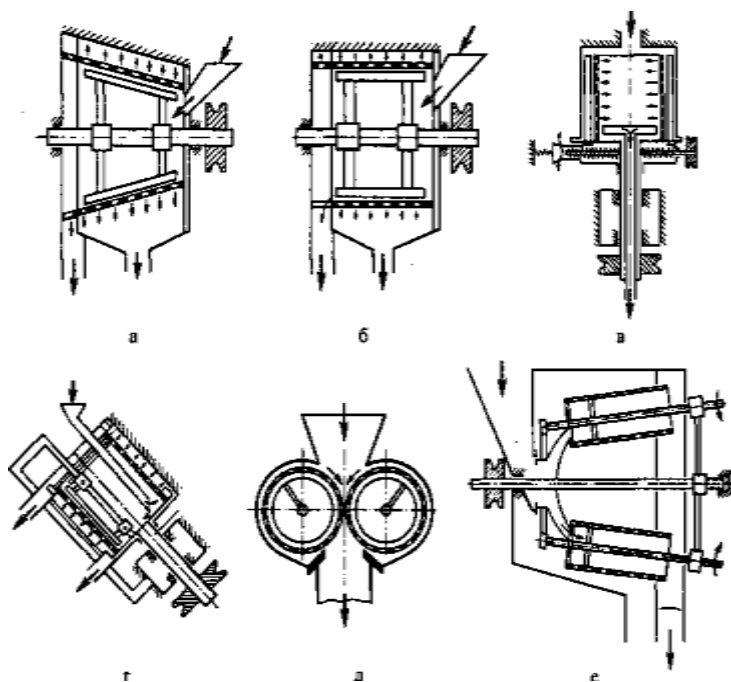


Рис. 3.11. Основные схемы протирочных машин
 а – с коническим ситчатым барабаном; б – с цилиндрическим ситчатым барабаном; в – с вращающимся вертикальным ситчатым барабаном при наружной подаче сырья;
 г – с наклонным вращающимся ситчатым барабаном и внутренней подачей сырья; д – двухбарабанная безбичевая; е – трёхбарабанная безбичевая

Протирочные машины кроме измельчения сырья обеспечивают разделение обрабатываемого сырья на две фракции: жидкую с мякотью, и твердую, представляющую собой отходы (кожица, семена, косточки, плодоножки и т.п.).

3.6. Элементы расчета дробилок

При расчете измельчающих машин основными задачами являются определение производительности, затрат мощности на привод и прочностные расчеты.

При расчете производительности щековой дробилки исходят из того, что за один оборот вала дробилки из неё выпадает количество материала, равное объему призмы, заключенной между щеками, и сечение которой имеет высоту h (см. рис. 3.12).

Расчетная формула для производительности в этом случае имеет вид:

$$P = 60 \cdot n \cdot \frac{2b + s}{2} \cdot \frac{s}{\operatorname{tg} \alpha} \cdot l \cdot \rho \cdot \varphi \quad , \quad (3.8)$$

где

P – производительность, кг/ч;

n – частота вращения вала дробилки, об/мин.;

b – минимальная ширина выпускной щели, м;

s – ход щеки, м;

l – длина выпускной щели (щеки), м;

α – угол захвата;

ρ – плотность материала, кг/м³;

φ – коэффициент разрыхления измельченного материала.

Угол захвата не должен превышать удвоенного угла трения для измельчаемого материала и обычно лежит в пределах $\alpha \leq 15^{\circ} \dots 22^{\circ}$.

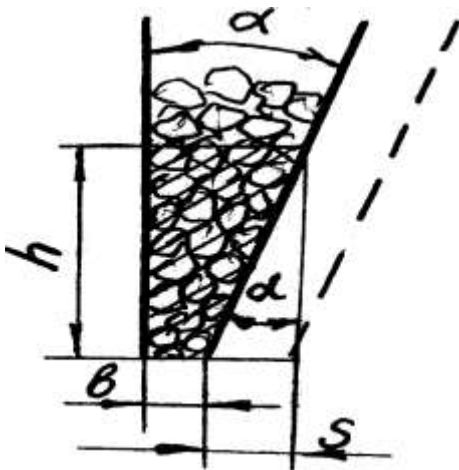


Рис. 3.12. К расчету производительности щековой дробилки

Для чаще всего применяемых в пищевой технологии дробилок среднего размера коэффициент разрыхления составляет $\varphi = 0,5 \dots 0,7$.

Частота вращения для щековых дробилок $n = 150 \dots 280$ об/мин.

Часовая производительность вальцовой дробилки определяется в зависимости от размеров щели и окружной скорости валков

$$P = 60 \pi D n \cdot b \cdot l \cdot \rho \cdot \varphi \quad , \quad (3.9)$$

где

P – производительность, кг/ч;

D – диаметр валка, м;

n – частота вращения валка, об/мин;

b – ширина щели, м;

l – длина щели (валка), м;

ρ – плотность материала, кг/м^3 ;

φ – коэффициент неравномерности питания валков (при измельчении зерна $\varphi = 0,5 \dots 0,7$).

Для обеспечения нормальной работы вальцовых дробилок должно быть обеспечено определенное соотношение между диаметром вала, размером измельчаемых частиц и шириной щели. Для гладких валков обычно $D/d = 20 \dots 25$, а для рифленых – $D/d = 10 \dots 12$.

Для лучшего истирания измельчаемого материала используют вальцовые дробилки с разной частотой вращения валков при соотношении $n_1/n_2 = 1/1,3 \dots 1/2,5$.

Для дробилок с разной частотой вращения валков

$$P = \omega_{cp} \cdot b \cdot l \cdot \rho \cdot \varphi \quad , \quad (3.10)$$

где ω_{cp} – средняя окружная скорость валков, м/с.

$$\omega_{cp} = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} \quad .$$

При расчете молотковых дробилок определяется окружная скорость для обеспечения достаточной для разрушения материала силы удара. Расчетная формула вытекает из закона сохранения количества движения

$$\omega = \frac{P \cdot \tau}{m} \quad , \quad (3.11)$$

где

ω – окружная скорость молотков, м/с;

P – расчетное усилие, Н;

τ – длительность удара, с (обычно принимают для зерна 10^{-5} с.);

m – масса измельчаемой частицы, кг.

Производительность дробилки может быть найдена по эмпирической формуле

$$P = \frac{k \cdot D^2 \cdot l \cdot n^2}{3,6(i - 1)}, \quad (3.12)$$

где

P – производительность, кг/ч;
 D – диаметр ротора, м;
 l – длина ротора, м;
 n – частота вращения, об/мин;
 i – степень измельчения.

Мощность на привод дробилок, как уже отмечалось выше, обычно находят по эмпирическим формулам. В частности, для молотковых дробилок мощность на привод может быть найдена по формуле

$$N = (0,1 \dots 0,15) P \cdot i, \quad (3.13)$$

где

P – производительность дробилки, т / ч;
 i – степень измельчения.

Тестовые контрольные вопросы и задания

1. Что собой представляет собой процесс измельчения? 2. Что такое дробление? 3. Что такое резание? 4. Что такое степень измельчения? 5. Что представляет собой открытый цикл измельчения? 6. Что представляет собой замкнутый цикл измельчения? 7. Назовите основные способы воздействий на материал при дроблении. 8. Перечислите виды дробления в зависимости от крупности частиц материала и степени измельчения. 9. Назовите основные виды дробилок в зависимости от их основного конструктив-

ного признака и принципа действия. 10. Какие виды дробилок называют мельницами? 11. Какие основные виды воздействий на материал реализуются в щековых дробилках? 12. Какие основные виды воздействий на материал реализуются в гирационных дробилках? 13. Какие основные виды воздействий на материал реализуются в валковых дробилках? 14. Какие основные виды воздействий на материал реализуются в молотковых дробилках? 15. Что собой представляет дезинтегратор? 16. Что собой представляет дисмембратор? 17. В чем состоит суть поверхностной гипотезы определения затрат энергии на измельчение при дроблении? 18. В чем состоит суть объемной гипотезы определения затрат энергии на измельчение при дроблении? 19. В чем состоит суть объединенной гипотезы Ребиндера определения затрат энергии на измельчение при дроблении? 20. Назовите основные виды режущих инструментов. 21. Назовите основные виды движений режущих инструментов при работе резательных машин. 22. Назовите четыре группы резательных машин в зависимости от их конструкции. 23. Что собой представляет волчек? 24. Что такое куттер? 25. Из каких составляющих состоит работа, затрачиваемая на резание? 26. Приведите формулу для расчета мощности на привод резки. 27. Что такое удельная работа резания? 28. Что такое удельная поверхность резания? 29. С какой целью применяются протирочные машины? 30. В чем заключается принцип действия протирочных машин?

4. Процессы классификации и ситовой анализ

4.1. Краткие сведения о процессах классификации

Классификация – разделение однородного сыпучего материала по размерам частиц в соответствии с требованиями технологии

Путем классификации сыпучий материал разделяют на фракции (классы), ограниченные определенными пределами размеров частиц (кусков).

Классификация используется как вспомогательная операция при подготовке материала к измельчению (удаление мелочи) или при возврате крупных частиц материала на повторное измельчение. Иногда классификацию применяют и в качестве самостоятельной операции, например, при выделении готового продукта заданного фракционного состава.

В практике используют три вида классификации:

- механическая классификация (грохочение) – рассев сыпучего материала на ситах, решетках или других устройствах;
- гидравлическая классификация – разделение смеси твердых частиц на фракции по величине скорости осаждения их в жидкости;
- воздушная классификация (сепарация) – разделение смеси твердых частиц на фракции по величине скорости их осаждения в воздухе.

Наибольшее практическое применение в сельскохозяйственном производстве имеет грохочение.

4.2. Оборудование для классификации

Устройства для рассеивания сыпучих материалов при механической классификации называют грохотами или се-

параторами. По своей конструкции и принципу действия различают следующие основные виды грохотов:

- колосниковые;
- качающиеся (гирационные);
- инерционные (вибрационные);
- барабанные.

Колосниковые грохоты используются для грубой сепарации. Для рассеивания сепарируемого материала в них применяются колосниковые решетки, то есть решетки, составленные из параллельных стержней – колосников. Колосники обычно имеют трапецеидальное сечение и устанавливаются так, чтобы зазоры между ними расширились книзу. Это предотвращает забивание щелей между колосниками материалом при его сепарировании.

Для тонкого сепарирования применяются вибрационные грохоты.

Кроме этих видов грохотов применяются также дисковые и роликовые грохоты, в которых просеивающая поверхность образована дисками или роликами, насаженными на вращающиеся горизонтальные валы. За счет вращения дисков и роликов обеспечивается продвижение материала вдоль рассеивающей поверхности и встряхивание его.

При рассеивании материала используются сита или решета. Решета изготовляют из металлических перфорированных листов. Форма отверстий бывает круглой, овальной, квадратной, прямоугольной, а для сепарирования гречи – треугольной. Сита изготавливают плетеными из круглой металлической проволоки или ткаными из шелковых, капроновых, нейлоновых или перлоновых нитей. Размер отверстий может составлять от 0,04 мм до 100 мм.

Основными характеристиками сита являются рабочий размер и коэффициент живого сечения. В качестве рабочего размера для сит с круглыми отверстиями принимают диаметр отверстий, для треугольных – длину стороны треугольника, для прочих – минимальный размер отвер-

ствий в свету. Под коэффициентом живого сечения сита понимают отношение суммарной площади сечения отверстий к общей площади сита, его значение обычно лежит в пределах 0,5...0,7. Пропускная способность сита зависит от его живого сечения. Количество материала, проходящего через сито в единицу времени называют *севкостью*. При одних и тех же размерах и форме отверстий севкость зависит от материала сита, вида просеиваемого материала (его скользкости) а также от способа просеивания.

Решета и плетеные сита обозначают номерами. Номер сита соответствует рабочему размеру в миллиметрах. Для тканых сит номер сита может соответствовать числу отверстий, приходящихся на 1 см или на 1 дюйм (25,4 мм).

По своей форме сита бывают плоскими либо цилиндрическими (призматическими). Цилиндрические или призматические грохоты применяются в барабанных грохотах или сепараторах.

При классификации должно происходить перемещение материала относительно рассеивающей поверхности. Это может достигаться за счет сил гравитации при наклонной неподвижной перфорированной поверхности, либо за счет инерционных сил при движущейся поверхности. Основные виды движений представлены на схемах просеивающих машин (рис. 1.).

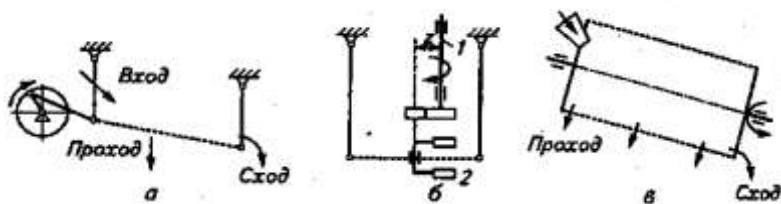


Рис. 4.1. Схемы рассеивающих машин:

а – с возвратно-поступательным движением; *б* – с круговым движением (о – эксцентриситет; 1 – веретено; 2 - уравновешивающие грузы); *в* – ротационный рассев (бурат)

В результате механической классификации получают два продукта: *отсев (проход)* и *отход (сход)*. *Отсев* составляют частицы, прошедшие через рассеивающее устройство, а *отход* – куски (частицы), не прошедшие через рассеивающее устройство.

Классификация бывает **однократной** и **многократной**. При однократной классификации материал просеивают через одно сито, при многократной – через несколько сит. При просеивании через несколько сит материал разделяют на фракции (классы). Классы зерен материала обозначают по размерам отверстий сит, через которые просеивался материал. Так, если материал просеивался последовательно на ситах № 2 и № 1, то сход с сита № 1 представляет фракцию или класс, который обозначается так: $(-2 + 1)$.

Многократная классификация может осуществляться тремя способами (рис. 2.):

- от мелкого к крупному – через последовательный ряд сит с увеличивающимися размерами отверстий;
- от крупного к мелкому – через расположенные друг под другом сита с уменьшающимися размерами отверстий;
- комбинированный.

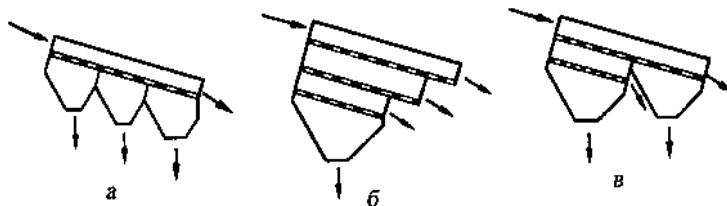


Рис. 4.2. Способы сепарирования:

а – от мелкого к крупному; б – от крупного к мелкому;
в - комбинированный

При первом способе сепарирования обеспечивается удобство смены сит и распределения материала по фракциям. Однако, этому способу присущи такие недостатки как пониженная эффективность разделения, повышенный износ мелких сит и повышенное крошение хрупких материалов при сепарировании.

При втором способе достигается более высокая эффективность сепарирования, меньший износ сит вследствие первоочередного отсеивания крупных кусков, меньшее крошение материала, компактность установки. К недостаткам этого способа относится сложность ремонта и смены сит, а также неудобства, связанные с разгрузкой всех фракций у одного конца грохота.

Ниже приводятся схемы некоторых видов машин для механической классификации сыпучих материалов.

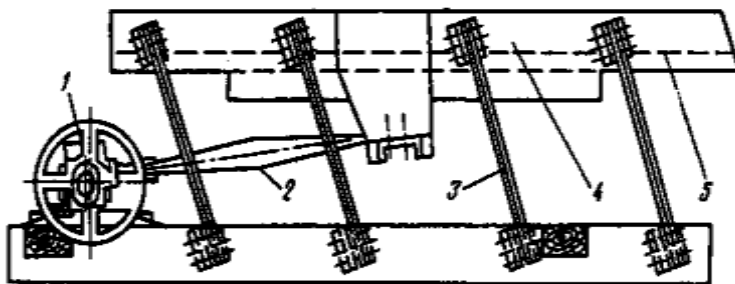


Рис. 4.3. Качающийся грохот:
1 – эксцентрик; 2 – шатун; 3 – пружина;
4 – корпус; 5 – сито

Представленный на рисунке грохот приводится в колебательное движение с помощью кривошипно-шатунного механизма. При работе грохота обеспечивается сотрясение материала и его перемешивание, в результате чего отсев проваливается в отверстия сита, а отход перемещается вдоль сита и сгружается на его конце. Для отбора несколь-

ких фракций сепарируемого материала применяют многоярусные качающиеся грохоты, работающие по схеме – от крупного к мелкому. Качающиеся грохоты имеют высокую производительность и эффективность сепарирования, компактны и достаточно удобны в обслуживании и ремонте. Главный недостаток качающихся грохотов заключается в неуравновешенности конструкции, что вызывает дополнительные динамические нагрузки на ее элементы.

Для очистки зерна, крупяных и бобовых культур от примесей используют горизонтальные и вертикальные барабанные сепараторы. В них используются металлические сита, в которых размеры отверстий увеличиваются по ходу движения разделяемого материала. Разделение смеси в вертикальных сепараторах происходит под действием центробежных сил, а в горизонтальных – под действием сил гравитации и благодаря перемешиванию и сотрясению материала при вращении и вибрации барабана.

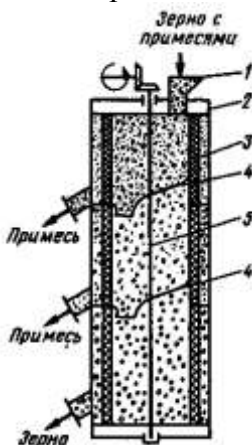


Рис. 4.4. Барабанный центробежный сепаратор:
 1 – воронка; 2 – корпус; 3 – барабан;
 4 – перегородка с каналом; 5 – вал

Разделение смесей из частиц примерно одинакового сечения, но различной длины производят не на ситах а на триерных (ячеистых) поверхностях. Устройства для разделения таких смесей называются триерами. Триеры широко используются для очистки зерна от примесей семян сорняков.

По конструкции различают цилиндрические и дисковые триеры. Принцип их действия проиллюстрирован рисунком 5.

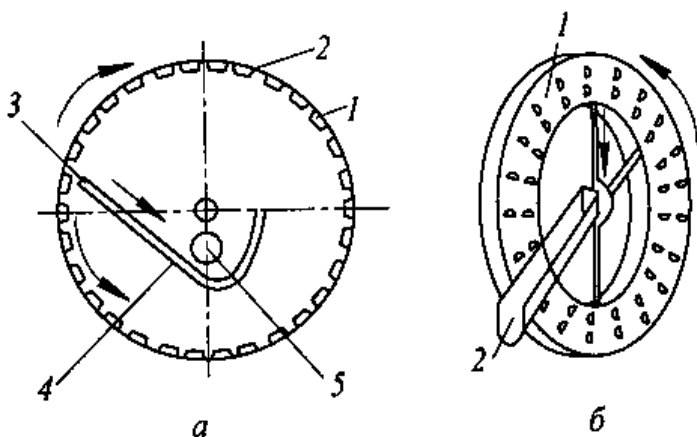


Рис. 4.5. Схемы цилиндрического и дискового триеров
 а – цилиндрический триер (1 – цилиндр; 2 – ячейки;
 3 – лоток; 4 – желоб; 5 – шнек); б – дисковый триер
 (1 – диск; 2 – желобок)

В цилиндрических триерах на внутренней поверхности цилиндра имеются штампованные ячейки, диаметр которых меньше длины частиц, которые должны быть выделены из смеси. При вращении барабана в ячейки попадают частицы, длина которых меньше диаметра ячеек, и, поднимаясь вверх до уровня выше верхней грани лотка, выпадают из ячеек в лоток, откуда выводятся наружу шнеком. Остающиеся в барабане длинные частицы выходят с другой стороны цилиндра.

В дисковых триерах ячейки выполнены на поверхности чугунных дисков. При вращении этих дисков, нижней частью погруженных в разделяемую смесь, короткие зерна поднимаются вверх до определенного уровня, после чего выпадают в желобки и выводятся из машины.

Для очистки сыпучего материала от ферромагнитных примесей применяются магнитные сепараторы. На рисунке 4.6 приведена схема барабанного электромагнитного сепаратора. На этом сепараторе эксцентрично установлен электромагнит так, что поверхность вращающегося барабана располагается в непосредственной близости от полюсов магнита. Движущиеся по конвейеру ферромагнитные частицы попадают в зону сильного магнитного поля и удерживаются на поверхности барабана, в то время как сыпучий материал, не обладающий магнитными свойствами сыпается в приемный бункер. Чугунные и стальные предметы и частицы отпадают вне бункера после выхода из зоны действия электромагнита.

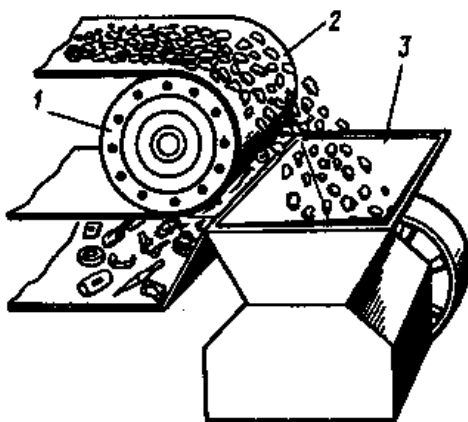


Рис.4.6. Магнитный барабанный сепаратор:

1 – сепаратор; 2 – конвейер; 3 – бункер

4.3. Ситовой анализ

Для определения фракционного состава сыпучих материалов применяют ситовой анализ. Ситовой анализ производится просеиванием материала через набор сит, площади отверстий которых уменьшается в постоянном соотношении от сита к ситу. Отношение размера ячеек сита к размеру ячеек последующего сита называется модулем набора сит. При ситовом анализе число фракций должно быть не менее 5, но не более 20.

Результаты ситового анализа представляются в виде графиков, представляющих дифференциальную и интегральную кривые распределения (рис.4.7). Дифференциальная кривая распределения (рис.4.7.а) показывает массовую долю отдельных фракций в материале, а интегральная кривая распределения (рис. 4.7. б) – суммарную массовую долю всех фракций меньше (или больше) заданного размера.

Фракция, представленная на графике точкой, соответствует среднему размеру частиц в ней, который представляет собой среднее арифметическое между размерами отверстий двух соседних сит (через одно сито фракция прошла, на другом задержалась).

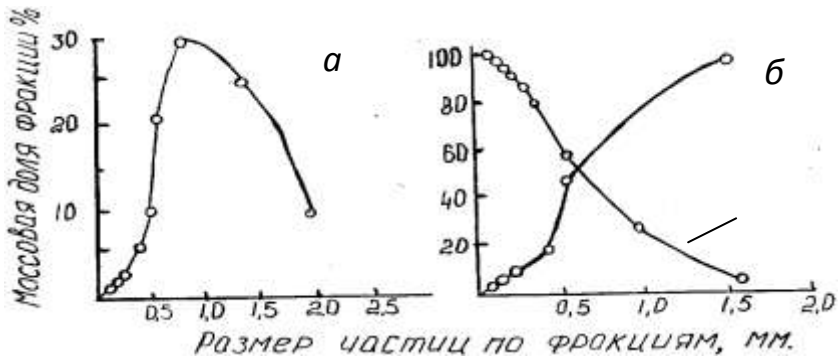
Средний размер частиц в пробе выражается через средневзвешенный диаметр d_{cp} , определяемый из соотношения:

$$d_{cp} = m_1 d_1 + m_2 d_2 + \dots + m_n d_n = \sum_1^n m_i d_i,$$

где

m_i – массовая доля каждой фракции в пробе;

d_i – средний размер частиц данной фракции



1 – проход; 2 – сход.

Рис. 4.7. Результаты ситового анализа:
 а – дифференциальная кривая распределения;
 б – интегральные кривые распределения

4.4. Основы расчета грохотов

Одной из главных задач расчета грохотов является определение их производительности. Производительность гирационного грохота определяют по формуле

$$П = 3600 \cdot \omega \cdot \rho_n \cdot S \cdot \varphi \quad (4.1),$$

где

П – производительность, кг/ч;

ω – скорость перемещения материала по сити, м/с ;

ρ_n – насыпная плотность материала, кг/м³ ;

S – площадь поперечного сечения материала на грохоте, м² ;

φ – коэффициент заполнения сита ($\varphi = 0.40 \dots 0.60$).

При ширине сита грохота B и толщине слоя материала h площадь сечения материала на грохоте $S = h \cdot B$. При этом толщину слоя материала принимают равной

$h \approx 1,5d_{max}$ (здесь d_{max} – размер наиболее крупных частиц сепарируемого материала).

Значение скорости перемещения материала по сити лежит в пределах 0,1...0,3 м/с и может быть найдено по эмпирической формуле

$$\omega = 0,23 \cdot n \cdot r \cdot f \cdot tg \alpha , \quad (4.2)$$

где

n – частота вращения вала привода, об/мин.;

r – эксцентриситет привода, м ($r = 0,01 \dots 0,02$ м);

f – коэффициент трения материала о сито ($f = 0,3 \dots 0,4$);

α – угол наклона пружин грохота к вертикали (обычно $\alpha \approx 20^\circ$).

Максимальные обороты привода определяют с учетом его эксцентриситета

$$n_{max} = 30 / \sqrt{r \cdot tg \alpha} . \quad (4.3)$$

Производительность барабанных сепараторов находят по эмпирической формуле

$$П = 720 \cdot \varphi \cdot \rho_n \cdot n \cdot tg(2 \alpha) \cdot \sqrt{R^3 h^3} , \quad (4.4)$$

где

$П$ – производительность, кг/ч;

φ – коэффициент разрыхления материала ($\varphi = 0,6 \dots 0,8$);

ρ_n –насыпная плотность материала, кг/м³ ;

n – частота вращения вала привода, об/мин.;
 α – угол наклона барабана к горизонту (обычно $\alpha \approx 20^\circ$).
 R – радиус барабана, м;
 h – высота слоя материала на сите, м.

Объемную производительность вибрационных грохотов определяют по эмпирической формуле

$$P_V = A \cdot F(55 + a)(60 + b)\sqrt{d} \quad , \quad (4.5)$$

где

P – производительность, м³/ч;
 A – эмпирический коэффициент ($A = 0,00047$ – для горизонтальных грохотов и $A = 0,00029$ – для наклонных);
 F – площадь сита, м² ;
 a – содержание нижнего продукта в исходном материале, %;
 b – содержание в нижнем продукте частиц, размером меньше половины отверстия сита, %;
 d – размер отверстия сита, мм.

Тестовые контрольные вопросы и задания

1. Что такое классификация? 2. Назовите виды классификации (сепарации). 3. В чем заключается механическая классификация? 4. В чем заключается гидравлическая классификация? 5. В чем заключается воздушная классификация (сепарация)? 6. В чем заключается магнитная сепарация? 7. Какие устройства применяются для механической классификации? 8. Назовите четыре вида грохотов. 9. Назовите три способа осуществления многократного сепарирования. 10. В чем заключается сепарирование от мелкого к крупному? 11. В чем заключается сепарирование

от крупного к мелкому? 12. В чем заключается комбинированный способ сепарирования? 13. Какие виды сит применяются в грохотах? 14. Какие виды движений совершают сита при работе грохотов? 15. Как называют продукты, получаемые в результате механической классификации? 16. Что такое триер? 17. Назовите два вида триеров по конструктивному исполнению. 18. Что такое фракция сыпучего материала? 19. Как обозначают сита рассеивающих устройств? 20. В чём состоит цель ситового анализа? 21. Как выполняется ситовой анализ? 22. Что такое массовая доля? 23. В каком виде обычно представляют результаты ситового анализа? 24. Что показывает дифференциальная кривая распределения в ситовом анализе? 25. Что показывают интегральные кривые распределения в ситовом анализе?

5. Процессы прессования и прессующие машины

5.1. Общие сведения о процессах прессования

Для обезвоживания, брикетирования твёрдых материалов, гранулирования и формования пластичных продуктов в пищевой промышленности применяют **прессование**, которое заключается в том, что обрабатываемый материал подвергают внешнему давлению в специальных прессах. По целевому назначению обработку материалов давлением можно разделить на следующие виды:

- отжатие
- брикетирование
- формование и штампование.

Отжатие заключается в отделении жидкости от твердой фазы под действием давления на обрабатываемый материал. Этот процесс неразрывно связан с фильтрацией жидкости через капилляры материала и уплотнением

остатка. С определенным основанием процесс отжатия можно отнести к гидромеханическим процессам. Процесс отжатия производят для выделения жидкости, когда она является ценным компонентом или когда с обезвоживанием ценность продукта увеличивается. Его осуществляют под действием избыточного давления поршня в прессах, которое прикладывается к материалу.

Отжатие используется в жировом производстве для выделения из семян подсолнечника растительного масла, в сахарном производстве для отжима воды из свекловичного жома, сока из сахарного тростника, в производстве соков для выделения его из ягод и плодов и в других производствах. Для повышения эффективности процесса отжатия материал часто проходит предварительную механическую обработку в виде дробления с целью разрушения клеточных оболочек, либо подвергается гидротермической, тепловой, ферментационной или электрической обработке. Эта обработка приводит к такому изменению структуры, либо свойств материала, при которых облегчается отделение жидкости.

Основными факторами, влияющими на выход жидкости, являются:

- величина давления при отжатии;
- свойства материала;
- содержание жидкой фазы;
- продолжительность действия давления и характер его изменения;
- термические условия;
- толщина слоя отжимаемого материала.

Процессы отжатия отличаются определенной сложностью, и обычно для определения выхода отделяемой жидкости пользуются эмпирическими формулами. Так, для расчета выхода масла отжатием из семян масличных культур используют эмпирическую зависимость

$$W = cW_0 \frac{\sqrt{P}}{V^a} \sqrt[6]{\tau}, \quad (5.1)$$

где W – выход масла, % ;

c – постоянная, зависящая от вида материала;

W_0 – содержание масла в исходном материале, % ;

P – давление при отжатии, Па;

τ – продолжительность отжатия, с;

V – кинематическая вязкость масла, м²/с ;

a – показатель, зависящий от вида масла.

Брикети́рование – процесс связывания частиц зернистых материалов в более крупные агрегаты (брикеты) при помощи связующей жидкости и соответствующего давления.

Брикети́рование, т.е. получение брикетов или брусков спрессованного материала определенной формы, применяют в сахарном производстве для получения брикетов свекловичного жома и сахара-рафинада, в производстве пищевых концентратов, в кондитерском и комбикормовом производствах, в процессах утилизации отходов пищевой промышленности и др.

Брикеты небольшого размера называют таблетками, а процесс их производства – **таблетированием**. Таблетки имеют размеры порядка 12...50 мм и обычно производятся способом прессования.

При прессовании происходит уплотнение материала, которое зависит от действующего давления и вида брикетируемого материала. Брикети́рование производят на специальных прессах до плотности, при которой брикет не

может самопроизвольно разрушаться. В процессе прессования уплотнение происходит за счет сближения частиц материала (уменьшения порозности), а также в результате деформации этих частиц. Остаточные (необратимые) деформации приводят к более плотной укладке частиц. Необратимые деформации могут протекать с разрушением частиц (хрупкие деформации) и без их разрушения (пластические деформации). При достижении определенной плотности брикета преобладающими становятся упругие деформации материала, и при этом даже значительное повышение давления не приводит к заметному увеличению плотности. Важным показателем процесса прессования является коэффициент уплотнения прессуемого материала

$$\beta = \frac{V}{V_1}, \quad (5.2)$$

где

V – объем материала до прессования;

V_1 – объем материала после прессования.

Коэффициент уплотнения показывает, во сколько раз увеличивается плотность материала при брикетировании. Его значение зависит от величины давления и от свойств материала. Иногда в качестве характеристики процесса используют коэффициент прессования, являющейся величиной обратной коэффициенту уплотнения

$$k_n = \frac{V_1}{V} = \frac{\rho}{\rho_1}, \quad (5.3)$$

где

ρ – плотность материала до прессования

ρ_1 – плотность материала после прессования.

При одностороннем прессовании из-за трения продукта о стенки матрицы плотность брикета оказывается неравномерной по его высоте. Более равномерную плотность брикета обеспечивает двустороннее прессование, что приводит к улучшению его качества. При этом давление прессования складывается из давления, затрачиваемого на деформацию и уплотнение продукта и давления на преодоление сил трения продукта о пресс-форму. Плотность брикета, как и коэффициент уплотнения зависит от свойств брикетируемого продукта и от величины давления прессования.

Как разновидности брикетирования можно рассматривать *дражирование* и *гранулирование*. Гранулы и драже имеют размеры в пределах 1...20 мм. При производстве гранул и драже используется агдезионное связывание (слипание) частиц материала.

Производство драже называют дражированием и осуществляют обычно способом окатывания. При дражировании семена, зерна, орешки, изюм или другие ядра будущих драже при наличии клеящего вещества перекатываются в агдезионном барабане и на них наслаиваются оболочки из порошков какао, сахарной пудры и других материалов. При дражировании посевных материалов на поверхность семян наносится слой из пестицидов и протравителей.

Гранулирование обычно осуществляют из растворов, суспензий и пульп с использованием газообразного сушильного агента. Процесс гранулирования производят в псевдооживленном слое, либо во встречных закрученных потоках. В обоих случаях подсушиваемые частицы суспензий или пульп при достижении определенной влажности слипаются, образуя более крупные агрегаты. При достижении определенных размеров и массы вновь образованные частицы (гранулы) выпадают из взвешенного состояния и отводятся как готовый продукт.

Гранулирование может осуществляться и способом прессования на специальных грануляторах.

Брикетирование, таблетирование и гранулирование применяют с целью повышения качества и продолжительности использования продукта, уменьшения потерь, улучшения транспортировки и т.д.

Формование и штампование – процесс придания пластическим материалам определенной геометрической формы путем воздействия давлением без отделения жидкости.

Формование пластичных материалов применяют в пищевом концентратном, хлебопекарном, кондитерском, макаронном, комбикормовом и других производствах для придания изделию заданной формы. При этом часто используют **экструзию** – технологический процесс обработки крахмалосодержащего сырья комплексным воздействием на него влаги, температуры, давления и напряжений сдвига с целью направленного изменения физико-химических свойств сырья и получения как полуфабрикатов, так и продуктов, готовых к употреблению.

Экструзию пищевых продуктов проводят в экструдерах путём размягчения или пластификации и придания им формы продавливанием через экструзионную головку, сечение которой соответствует конфигурации изделия. Экструдировать, что буквально означает **«выталкивать наружу»**, можно различными способами.

Экструзия бывает **холодной, тёплой и горячей (варочной)**. При холодной – происходит только механическое формование пластического сырья в результате продавливания его через матрицу. Этот вид экструзии применяют при выработке мучных изделий, макарон, плавленых сыров, конфетных масс, мясного фарша и других продуктов. Тёплую экструзию используют для частичной клейстеризации крахмалосодержащих материалов влажностью 20...30% с последующей обжаркой или выпечкой. При го-

рячей (варочной) экструзии во время нагревания (температура процесса обработки сырья превышает 100°С) в перерабатываемом материале происходят необратимые биохимические изменения, прежде всего, белков, крахмала и клетчатки. Этот процесс проводится при высоких скоростях и давлениях, значительном переходе механической энергии в тепловую. Полученный таким образом экструдированный продукт затем сушат или обжаривают и покрывают вкусовыми добавками. Способом варочной экструзии получают сухие завтраки, хлебцы, сухие напитки, супы, мясопродукты, детское питание, гранулированные корма.

Готовый продукт или полуфабрикат, произведённый на экструдере, называют экструдатом. Его форма определяется конфигурацией отверстий в матрице, которую устанавливают на выходе материала из экструдера. Особое значение имеют такие параметры, как количество тепловой энергии, образующейся в процессе экструдирования за счёт механического преобразования энергии, температура во время ведения процесса, влажность экструдруемой массы.

5.2. Оборудование для обработки материалов давлением

В пищевой промышленности для обработки продуктов прессованием применяют прессы различных конструкций, которые по типу привода можно разделить на две группы: гидравлические и механические. По типу основного рабочего органа отжимающие прессы бывают поршневыми, шнековыми и вальцовыми. Шнековые и вальцовые прессы являются машинами непрерывного действия, поршневые – периодического действия. Конструктивно прессы могут отличаться также количеством рабочих органов и их расположением. Ниже на рисунках представлены схемы некоторых отжимающих прессов.

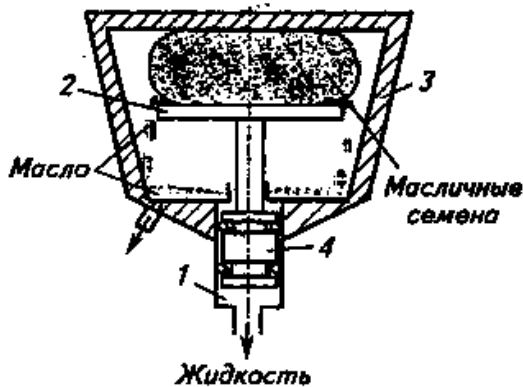


Рис. 5.1. Схема гидравлического отжимающего пресса:
1 – гидроцилиндр; 2 – подъемный стол;
3 – корпус; 4 – поршень

Изображенный на рисунке 5.1 пресс периодического действия. При его работе прессуемую массу в пакетах из прочной ткани укладывают слоями на поддон, установленный на подъемном столе, разделяя слои стальными листами. Рабочий цикл пресса при выжимке растительного масла составляет 20...25 минут и состоит из загрузки сырья, предварительного поджатия до давления около 5 МПа, выдержки с целью оттока основной массы выжатого масла, повышения давления до 8 МПа, выдержки и опускания подъемного стола.

Представленный на рисунке 5.1 пресс называют открытым, поскольку рабочая зона является полностью открытой. Наряду с открытыми прессами применяют полузакрытые, закрытые или зерновые прессы. В зерновых прессах прессуемая масса помещается в перфорированные коробки (зееры), и отжатая жидкость стекает через отверстия в зеерах.

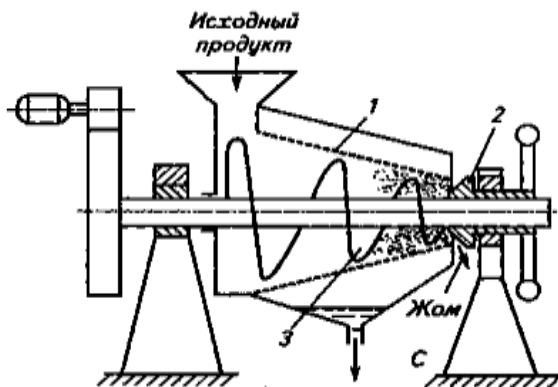


Рис. 5.2. Схема шнекового зернового пресса:
 1 – зер (перфорированный корпус);
 2 – регулирующий конус; 3– шнек

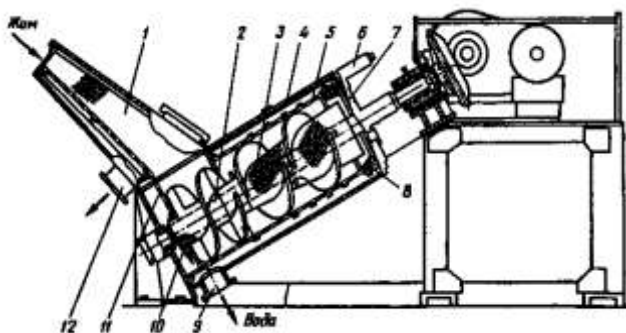


Рис. 5.3. Схема наклонного отжимного пресса:
 1 – сепаратор; 2 – вал шнека; 3 – сито;
 4 – отжимной шнек; 5 – цилиндрическое сито;
 6 – регулировочное приспособление; 7 – отверстие для выгрузки жома; 8 – коническое сито; 9, 12 – штуцеры для отвода воды; 10 – отверстие для удаления воды; 11 – дополнительная поверхность фильтрация

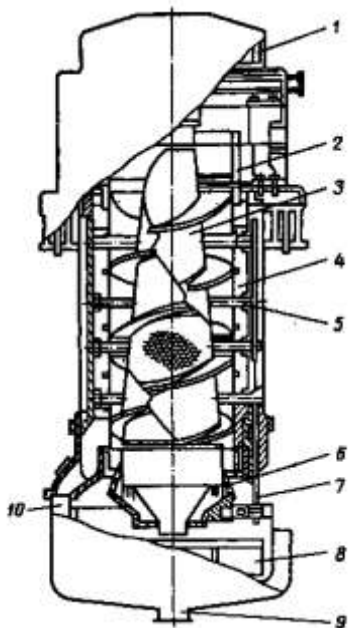


Рис. 5.4. Схема вертикально-шнекового пресса

- 1 – приводная шестерня;
- 2 – загрузочная воронка;
- 3 – шнек;
- 4 – разъемное сито;
- 5 – контролопасть;
- 6 – болт;
- 7 – скребок;
- 8 – штуцер;
- 9 – канал

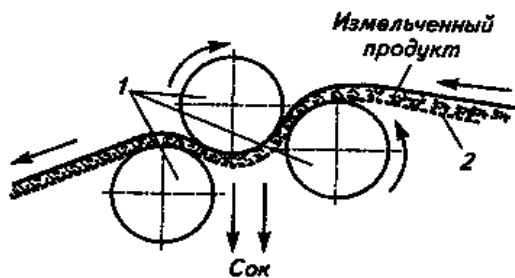


Рис. 5.5. Схема вальцового отжимающего пресса:
1 – валки; 2 – перфорированная резиновая лента

В вальцовом отжимном прессе (рис.5.5) измельченный продукт на перфорированной резиновой ленте прохо-

дит между тремя валками, которые сжимают слой продукта. Отжатый сок стекает в емкость, расположенную под прессом.

Для брикетирования и таблетирования применяют штемпельные и ротационные прессы. В штемпельных прессах матрица является неподвижной, а пуансон (штемпель) совершает возвратно-поступательное движение. В ротационных прессах прессующий узел состоит из прессующих валков и вращающейся матрицы, которая может быть плоской, либо цилиндрической.

На рисунке 5.6 представлена схема работы дискового (карусельного) пресса.

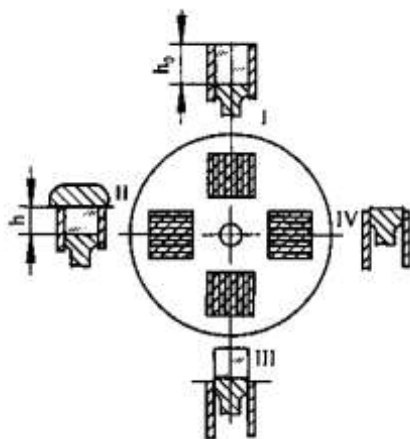


Рис. 5.6. Схема работы дискового пресса

Дисковый пресс, используемый в производстве пресованного сахара-рафинада, имеет вращающийся стол, который представляет собой диск со вставленными в его отверстия латунными матрицами. Стол вращается против часовой стрелки. За время одного оборота стол делает четыре остановки, при которых последовательно осуществляются следующие операции: I – заполнение матрицы рафинадной крошкой; II - формование при движении пуансона вверх с

расположенным над матрицей упором; III – выталкивание бруска сахара пуансоном из матрицы; IV – очистка пуансона от остатков сахара и натирка мастикой.

Для таблетирования в основном используются ротационные машины. В них продукт подвергается двухстороннему прессованию пуансонами, смонтированными на двух уровнях во вращающийся ротор. Пуансоны перемещаются вдоль вертикальной оси, благодаря наличию специальных копиров. При вращении ротора пуансоны, двигаясь в матрице, заполненной прессуемым материалом, сжимают его с двух сторон. Полученная таким образом таблетка выталкивается из матрицы нижним пуансоном при отведенном верхнем.

На рисунке 5.7 приведена схема прессующего механизма гранулятора с плоской матрицей. При работе этого гранулятора сыпучий продукт непрерывно подают на рабочую поверхность матрицы. Прессующие ролики перекачиваются по слою продукта, сжимают его и проталкивают в фильеры толстостенной матрицы. За один проход прессующего ролика гранула проталкивается в фильере и выдвигается из выходного отверстия матрицы на несколько миллиметров. Под матрицей устанавливают вращающиеся ножи, которые срезают гранулы.

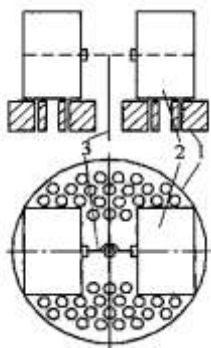


Рис. 5.7. Схема прессующего механизма гранулятора:
1 – матрица; 2 – прессующие ролики; 3 – водило

Формующие и штампующие машины различаются способом создания давления на обрабатываемый материал: штампование; прокатывание; нагнетание. По типу основного рабочего органа их подразделяют на эксцентриковые, ротационные, барабанные, ленточные, шнековые, дисковые, поршневые, валковые, винтовые, шестерённые и комбинированные,

Формующие машины также могут быть классифицированы по отдельным конструктивным признакам рабочих органов, их расположению и частоте вращения. К отдельной группе формующих машин можно отнести экструдеры, которые бывают одно- и двухшнековыми.

Ниже приведены схемы некоторых формующих машин.

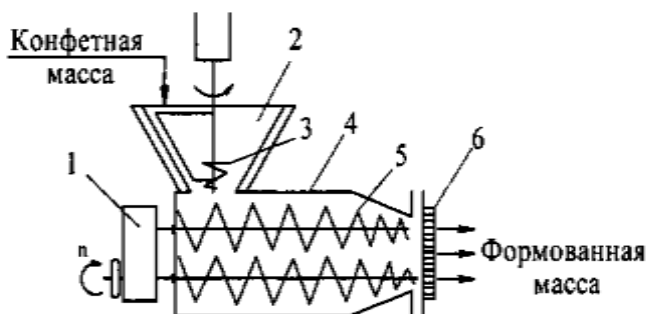


Рис. 5.8. Схема двухшнекового формовочного пресса:

- 1 – привод; 2 – загрузочный бункер;
- 3 – дозирующий шнек; 4 – корпус пресса;
- 5 – шнек; 6 - фильера

Приведенный на рисунке 5.8 формовочный пресс используют в производстве конфет, в частности пралине, методом продавливания конфетной массы через фильеру с калиброванными отверстиями. На выходе из фильеры жгуты конфетной массы рубятся на гранулы эксцентрично установленным вращающимся ножом.

На рисунке 5.9 показана схема (анфас и план) раскатывания тестовой заготовки в цилиндрический батон ленточной прокатывающей машиной.

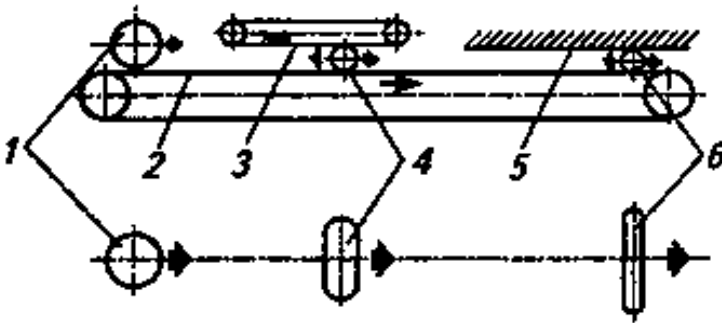


Рис. 5.9. Схема ленточной прокатывающей машины:
 1 – кусок теста; 2, 3 – конвейеры;
 4 – кусок теста цилиндрической формы;
 5 – неподвижная плоскость;
 6 – кусок теста в форме батона

На рисунке 5.10 представлена схема одношнекового экструдера. Особенностью экструдеров состоит в том, что перерабатываемый продукт подвергается не только механическому, но и тепловому воздействию. Корпус, как правило, обогревается электрическими нагревателями, а шнеки при необходимости могут охлаждаться водой, циркулирующей через отверстия в секциях корпуса или в пустотелых валах шнеков. При этом по длине шнека может меняться фазовое состояние и физико-химические свойства продукта.

На приведенной схеме экструдера зона 1 соответствует материалу в увлажненном состоянии, зона 2 – в пластическом состоянии, в зоне 3 материал представляет собой аморфную текучую массу.

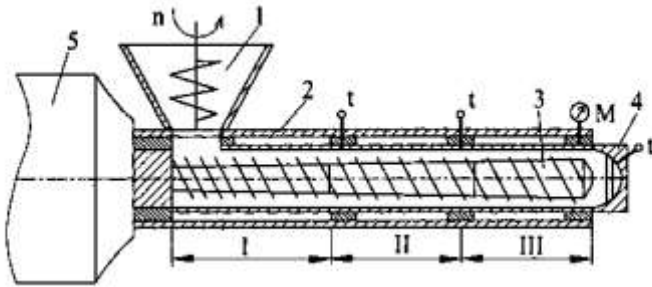


Рис. 5.10. Схема одношнекового экструдера
 1 – загрузочная воронка; 2 – корпус; 3 – шнек;
 4 – фильеры; 5 – привод;
 t – термопары; М – датчик давления

Одношнековые экструдеры имеют как достоинства, так и недостатки. Они проще по конструкции и в изготовлении, но по некоторым параметрам сложны в эксплуатации. В одношнековых экструдерах недостаточно хорошее смешивание обрабатываемого продукта. При переходе с одного сырья на другое требуется очистка камеры и шнека с разборкой экструдера. Это приводит к большим простоям при чистке, а также большим трудозатратам по обслуживанию экструдеров.

Двухшнековые экструдеры, несмотря на большую сложность и стоимость обеспечивают более высокое качество продукции. В них достигается точное объемное дозирование, лучшее перемешивание продукта, самоочистка и способность перерабатывать смеси с высоким содержанием жира и сахара.

Тестовые контрольные вопросы и задания

1. Что собой представляет собой процесс прессования? 2. Назовите три вида обработки материалов давлением по целевому назначению. 3. Что собой представляет отжатие? 4. Что собой представляет брикетирование? 5. Что собой представляет формование? 6. Что такое коэффициент уплотнения? 7. Что такое коэффициент прессования? 8. Назовите разновидности брикетирования. 9. Назовите способы, применяемые при производстве гранул и драже. 10. Что собой представляет процесс экструзии? 11. Назовите виды экструзии? 12. В чем состоит особенность холодной экструзии? 13. В чем состоит особенность теплой экструзии? 14. В чем состоит особенность варочной экструзии? 15. Назовите основные рабочие органы экструдера? 16. Назовите виды отжимающих прессов по типу основного рабочего органа. 17. Назовите виды штампующих прессов по основному конструктивному признаку и принципу действия. 18. Назовите виды формующих машин по способу создания давления? 19. Из каких составляющих складывается давление прессования? 20. От каких величин зависят коэффициент уплотнения и плотность брикета?

6. Перемешивание сыпучих материалов

В некоторых технологиях пищевой отрасли возникает необходимость получения однородных смесей из сыпучих компонентов, имеющих различные свойства и фракционный состав. Обычно для этой цели используются процесс механического перемешивания с использованием смесителей различных конструкций.

Схемы основных видов смесителей сыпучих материалов приведены на рисунке 6.1.

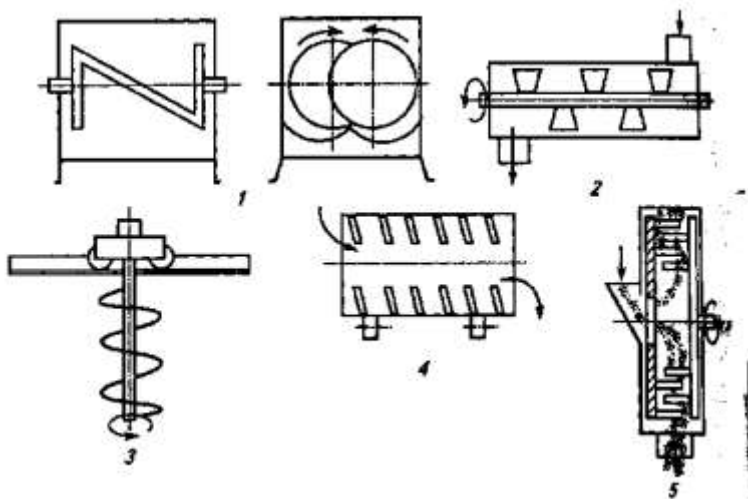


Рис. 6.1. Схемы смесителей сыпучих продуктов:

- 1 – лопастной; 2 – шнековый; 3 – ворошитель;
4 – барабанный; 5 – ударный

Смесители сыпучих продуктов по организации процесса работы делятся на аппараты периодического и непрерывного действия. По конструктивным признакам смесители делят на лопастные, шнековые, барабанные, ударные и центробежные. Среди шнековых смесителей можно выделить ворошители и конвейеры.

Лопастные смесители обычно имеют два ротора, вращающихся в противоположных направлениях.

Шнековые смесители одновременно с перемешиванием осуществляют транспортирование материала. Ворошитель представляет собой шнековый смеситель, с несколькими вертикальными шнеками (может быть более восьми) установленными на подвижной раме, которая может перемещаться над перемешиваемым материалом.

В барабанном смесителе перемешивание происходит

при пересыпании материала в процессе вращения барабана, снабженного внутренними лопатками. Материал подается в барабан и удаляется из него питающим шнеком.

Ударный смеситель по своей конструкции аналогичен дезинтегратору. Перемешивание в нем осуществляется за счет удара бил о частицы материала, в результате чего происходит дробление частиц и перемещение их в пространстве.

На рисунке 6. 2 показана схема двухвального ленточного смесителя, который может использоваться для эффективного перемешивания сыпучих материалов с добавлением до 50% жидких продуктов.

В центробежных смесителях перемешивание обеспечивается за счет действия на частицы сыпучего материала центробежных сил. Устройство центробежного смесителя представлено на рисунке 6.3.

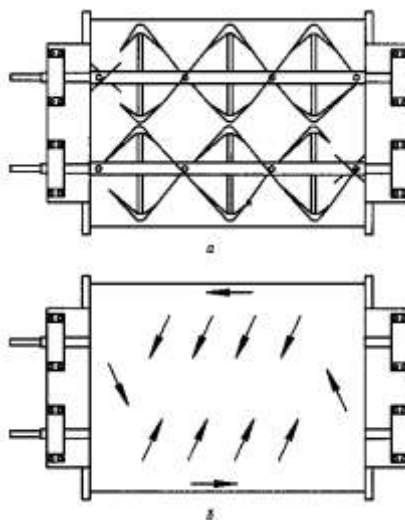


Рис. 6.2. Двухвальный смеситель:
а – схема рабочего органа; б – схема направлений потоков при перемешивании

В центробежном смесителе (рис.6. 3) для интенсивной внутренней циркуляции материала применяют вращающийся конус, установленный в корпусе с конической нижней частью. При вращении конуса 1 засыпанный в корпус материал вовлекается во вращение и под действием центробежных сил движется по внутренней поверхности конуса вверх и сбрасывается в кольцевое пространство между конусом и корпусом. Новые порции материала поступают внутрь конуса из кольцевого пространства через окно 6. При такой циркуляции материала внутри аппарата происходит его перемешивание. Вращающаяся вместе с конусом лопастная мешалка 5 увеличивает подвижность материала в нижней части корпуса. Для материалов с плохой сыпучестью в корпусе устанавливают свободно вращающуюся раму 15 с лопастями и скребком. Рама вовлекается во вращение материалом, а ленточный тормоз 14 позволяет установить скорость вращения рамы, отличающуюся от скорости вращения материала. Это способствует улучшению процесса смешивания материала.

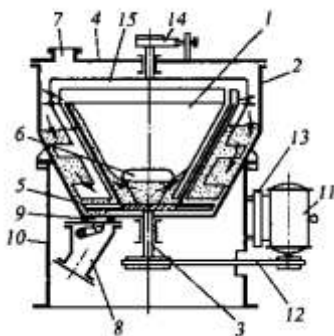


Рис. 6.3. Схема центробежного смесителя

1 – конус; 2 – корпус; 3 – вал; 4 – крышка; 5 – мешалка; 6 – окно; 7 – патрубок; 8 – клапанная коробка; 9 – клапан; 10 – подставка; 11 – электродвигатель; 12 – клиноременная передача; 13 – плита; 14 – тормоз; 15 – рама

Примером смесителя со сложным движением основных рабочих органов является приведенный на рисунке 6.4 спаренный планетарно-червячный смеситель, предназначенный для смешивания зернистых материалов с диаметром частиц не более 10 мм.

Внутри конического корпуса смесителя расположен наклонный червяк, который вращается одновременно вокруг собственной оси и при помощи водила вокруг конического корпуса смесителя.

Частицы материала перемещаются червяком вдоль стенок корпуса вверх, а затем падают вниз под действием сил гравитации. Частота вращения червяка – 60 мин^{-1} , водила – $1,58 \text{ мин}^{-1}$. Приводы червяков и водила установлены на общей крышке сдвоенного конического корпуса смесителя. Этот смеситель обеспечивает хорошее смешивание при небольшом расходе энергии.

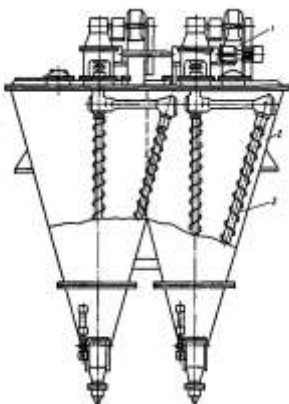


Рис. 6.4. Смеситель-усреднитель с планетарным червячным перемешивающим устройством
1 – привод; 2 – конический корпус;
3 – перемешивающее устройство

На рисунке 6.5 приведены схемы гравитационных смесителей, в которых компоненты смешиваются при

движении сыпучего материала в корпусе смесителя под действием сил тяжести.

В лотковом смесителе (рис. 6.5,*а*) внутри корпуса прямоугольного сечения установлены друг над другом наклонные лотки. Смешиваемые компоненты подаются в корпус непрерывным потоком сверху через два штуцера и стекают тонким слоем по лоткам вниз. Смешивание компонентов происходит при встрече потоков, стекающих с первых двух лотков и при дальнейшем их движении по лоткам и при пересыпании с лотка на лоток.

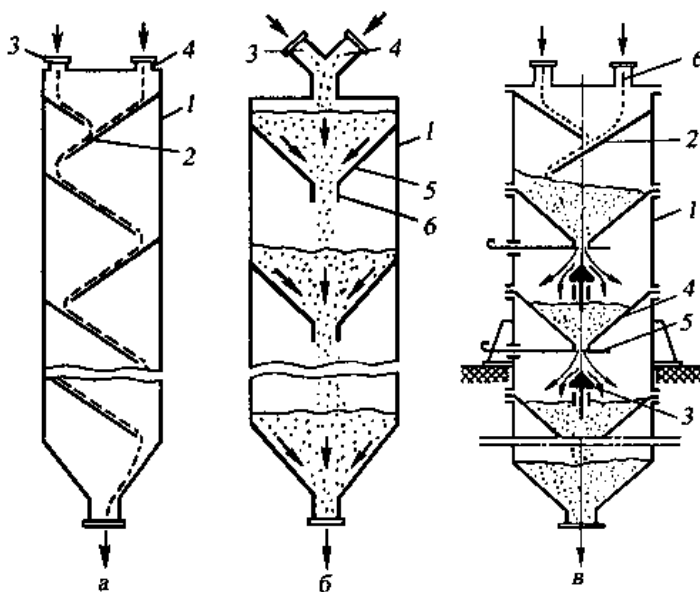


Рис. 6.5. Схемы гравитационных смесителей:

а – лотковый: 1 – корпус; 2 – лотки; 3, 4 – штуцеры;
б – бункерный: 1 – корпус; 3, 4 – штуцеры; 5 – конические днища; 6 – выпускные отверстия; *в* – ударно-распылительный: 1 – корпус; 2 – лотки; 3 – ударно-распылительный наконечник; 4 – днище; 5 – шибер; 6 – патрубки.

Более благоприятные условия для перераспределения частиц сыпучего материала и их смешивания созданы в бункерном гравитационном смесителе. В цилиндрическом корпусе смесителя этого типа друг над другом располагаются пять или шесть бункеров с коническими днищами. Диаметр выпускных отверстий b в днищах выбирается с таким расчетом, чтобы при пересыпания материала из бункера в бункер в них всегда находилось определенное количество материала.

Гравитационный ударно-распылительный смеситель (рис.6.5, в), состоит из нескольких секций с коническими днищами. В днищах имеются выпускные отверстия с шиберами. Выходящая из отверстия днища струя материала попадает на наконечник 3 и распыляется в виде факела из частиц перемешиваемого материала. Оседающие из факела частицы распределяются по слою материала, находящегося в бункере нижележащей секции. Смешивание компонентов происходит как при движении материала в бункерах, так и в факелах, образующихся при попадании на распылительный наконечник.

В вибросмесителе (рис. 6.6) перемешивание материала происходит за счет вибрации, создаваемой закрепленными на вращающемся внутри трубы 2 валу дебалансами. Труба установлена в корпусе эксцентрично. В процессе работы смесителя между материалом и вибрирующими элементами (корпусом и трубой) образуются серповидные зазоры, положение которых меняется в соответствии с положением вращающихся дебалансов. Благодаря этому всей массе материала придается вращательное движение. Смешиваемый материал поступает через патрубок 9, сваренный в одном конце корпуса, а выгружается через патрубок 6, сваренный в другом конце корпуса. Материал имеет продольное перемещение вследствие разницы в высоте слоя в местах загрузки и выгрузки .

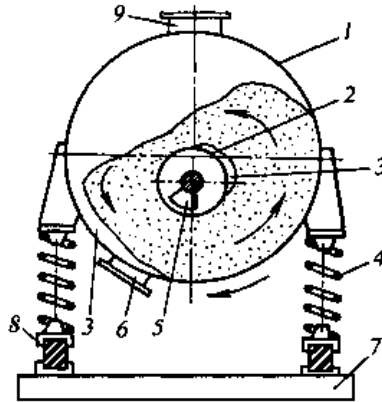


Рис. 6.6. Схема вибросмесителя

1 – корпус; 2 – труба; 3 – зазор; 4 – пружина;
5 – дебаланс; 6, 9 – патрубок; 7 – станина; 8 – прокладка

Перемешивание сыпучих зернистых материалов может производиться также в аппаратах с псевдооживлением.

Тестовые контрольные вопросы и задания

1. С какой целью используются смесители сыпучих материалов. 2. Назовите основные виды смесителей для сыпучих материалов. 3. Каков принцип действия центробежного смесителя? 4. Назовите виды гравитационных смесителей для сыпучих материалов. 5. Опишите принцип действия вибрационного смесителя.

7. Основы гидравлики

7.1. Общие сведения о гидравлике

Гидравлика – раздел механики, в котором изучаются законы равновесия и движения жидкостей, а также рассматривается их практическое применение. Гидравлика состоит из гидростатики и гидродинамики. В гидростатике изучаются законы равновесия жидкостей и воздействие покоящихся жидкостей на погруженные в них тела и поверхности, а в гидродинамике – законы движения жидкостей и воздействие на обтекаемые ими тела. При этом в гидравлике под термином «жидкость» обычно понимают капельную жидкость, а также газы и их пары, когда можно пренебречь их сжимаемостью.

Основная особенность жидкостей и газов как рабочих тел — их сплошность. Предполагается, что любой объем заполняется ими равномерно, без образования пустот. В широком смысле жидкости можно разделить на капельные и газообразные.

Капельные жидкости (или просто жидкости) в малых количествах собираются в капли, форма которых определяется силами тяжести и поверхностного натяжения. В больших количествах капельные жидкости принимают форму сосуда, в котором они находятся, с образованием поверхности раздела между жидкостью и окружающей средой.

Газы не образуют капель, а замкнутые сосуды заполняют целиком без образования поверхностей раздела.

С молекулярно-кинетических позиций о строении вещества различия капельных жидкостей и газов определяются количеством химических или силовых связей молекул вещества. В газах межмолекулярные силовые связи проявляются слабо, а расстояния между молекулами суще-

ственно больше чем в жидкости. Следствием этого является то, что уменьшить эти расстояния, т.е. сжать капельную жидкость, затруднительно, а газ — относительно легко. Поэтому капельные жидкости считаются несжимаемыми, а газы — сжимаемыми. На основании этого деление сплошных сред на жидкости и газы может заменяться делением на сжимаемые и несжимаемые жидкости.

При изучении законов гидравлики рассматривают три типа капельных жидкостей:

- **идеальная жидкость.** Это абстрактная модель жидкости, характеризующаяся абсолютной текучестью и неизменяемостью объема при изменении внешних условий (абсолютной несжимаемостью). Вязкость в таких жидкостях отсутствует;

- **реальные, или вязкие, жидкости.** Это вещества, обладающие большой подвижностью и способные изменять свой объем при изменении внешних условий. При движении таких жидкостей возникают вследствие внутреннего трения касательные напряжения. Называют такие жидкости **ньютоновскими**;

- **неньютоновские, или реологические, жидкости.** Они имеют специфические свойства, часть из которых рассматривается далее.

Жидкость в гидравлике рассматривается как непрерывная среда, т.е. в гидравлике отвлекаются от ее молекулярного строения.

В покоящейся жидкости нет перемещения слоев относительно друг друга. Это показывает, что в жидкости действуют не сосредоточенные силы, а силы, непрерывно распределенные по ее объему (массе) или по поверхности. В связи с этим силы, действующие на жидкость, разделяют на массовые (объемные) и поверхностные.

Массовые силы пропорциональны массе жидкости и, если жидкость однородна, пропорциональны ее объему. К

массовым силам относятся сила тяжести и сила инерции, которая действует на жидкость при относительном ее покое во вращающихся или ускоренно движущихся сосудах.

Поверхностные силы непрерывно распределены по поверхности жидкости и в случае равномерности распределения пропорциональны площади этой поверхности. Если массовые силы обусловлены силами тяжести и инерции, то поверхностные вызваны непосредственным воздействием других тел (твердых или газообразных), соприкасающихся с данной жидкостью. Согласно третьему закону Ньютона жидкость действует на другие тела с той же силой, но в противоположном направлении. Массовые силы относят к единице массы ($H/кг$), а поверхностные — к единице площади поверхности ($1 H/м^2 = 1 Па$).

7.2. Элементы гидростатики

Гидростатика рассматривает системы с покоящейся жидкостью. Важным параметром таких систем является давление. Давление в покоящейся жидкости называют **гидростатическим давлением**. Гидростатическое давление обладает следующими основными свойствами:

- В любой точке жидкости гидростатическое давление перпендикулярно площадке касательной к выделенному объему и действует внутрь рассматриваемого объема жидкости.
- Гидростатическое давление действует одинаково во всех направлениях.
- Гидростатическое давление в точке зависит от ее координат в пространстве.

Если рассмотреть равновесие покоящейся жидкости, которая находится в каком-либо сосуде, то можно получить **основное уравнение гидростатики**, позволяющее рассчитывать давление в любой точке покоящейся жидко-

сти. Это уравнение имеет вид:

$$p = p_0 + \rho \cdot g \cdot h , \quad (7.1)$$

где p_0 – давление, действующее на свободную поверхность жидкости, Па;

ρ – плотность жидкости, кг/м³ ;

g – ускорение свободного падения, м/с² ;

h – высота столба жидкости над данной точкой, м.

Следствием основного уравнения гидростатики является **закон Паскаля**, который можно сформулировать следующим образом:

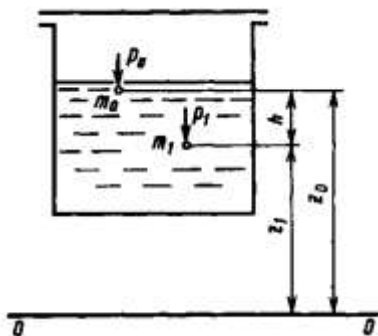


Рис. 7.1. Иллюстрация к основному закону гидростатики

Давление, приложенное к внешней поверхности жидкости, передается всем точкам этой жидкости и по всем направлениям одинаково.

На использовании закона Паскаля основана работа таких гидростатических машин, как гидравлический пресс, гидравлический аккумулятор и гидравлический мультипликатор. Из закона Паскаля следует также, что в открытых сообщающихся сосудах внешняя поверхность жидкости устанавливается на одном уровне. Использование основного уравнения гидростатики позволяет определить силы, и построить эпюры сил и давлений, действующих со стороны покоящейся жидкости на любые поверхности.

Одним из важнейших законов гидростатики является закон Архимеда, который можно сформулировать так:

Тело, погруженное (полностью или частично) в жидкость, испытывает со стороны жидкости суммарное давление, направленное снизу вверх и равное весу жидкости в объеме погруженной части тела.

7.3. Элементы гидродинамики

Одним из основных свойств капельных жидкостей и газов является их способность приходить в движение (течь) под действием движущих сил – разности давлений, создаваемой насосом или компрессором, разности уровней либо разности плотностей.

В зависимости от закономерностей движения жидкостей различают установившееся движение и неустойчивое. При установившемся движении скорость, ускорение, давление в каждой фиксированной точке пространства остаются неизменными во времени. В противном случае имеем неустойчивое движение.

Устойчивое движение потоков характерно для непрерывных, а неустойчивое – для периодических процессов.

Важными характеристиками потока жидкости являются расход и скорость потока.

Расход – это количество жидкости, проходящее через какое-то сечение в единицу времени. При этом различают массовый G и объемный V расход, для которых используют единицы измерения соответственно кг/с и м³/с.

Скорость движения ω представляет собой путь, проходимый в единицу времени. В качестве единицы измерения скорости обычно используется метр в секунду (м/с).

Если рассмотреть поток жидкости, движущейся по трубопроводу или каналу, то оказывается, что частицы

жидкости, находящиеся на разном расстоянии от оси потока имеют различную скорость. В технике, в основном, оперируют средней скоростью потока.

Между скоростью и расходом существует такая связь:

$$\omega = \frac{V}{F} \quad \text{или} \quad \omega = \frac{G}{\rho \cdot F}, \quad (7.2)$$

где

F – площадь поперечного сечения потока, m^2 .

ρ – плотность среды, kg/m^3 ;

Относительное движение слоев (частиц) жидкости в потоке вызывает эффект сопротивления, называемый **вязкостью**. Вязкость обусловлена наличием внутреннего трения между слоями жидкости и приводит к появлению касательных напряжений в потоке.

Исследование движения вязких жидкостей показывает, что существуют два режима, резко отличающихся друг от друга – **ламинарный** и **турбулентный**.

При ламинарном режиме струйки или слои жидкости движутся параллельно друг другу не перемешиваясь. Ламинарный режим обычно имеет место при малых скоростях движения потока.

Турбулентный режим характеризуется хаотическим движением частиц жидкости в потоке и их интенсивным перемешиванием. Такой режим наблюдается при высоких скоростях потока жидкости.

Вязкие свойства жидкости оцениваются коэффициентами динамической и кинематической вязкости.

Динамическая вязкость (коэффициент динамической вязкости) представляет собой коэффициент пропорциональности в выражении напряжения сдвига при ламинарном течении ньютоновской жидкости:

$$\tau = -\mu \cdot \nabla \omega \quad , \quad (7.3)$$

где

τ – напряжение сдвига между слоями жидкости, Па;

μ – динамическая вязкость, Па с;

$\nabla \omega$ – градиент скорости в направлении по нормали к направлению потока.

То есть

$$\mu = \frac{\tau}{\nabla \omega} \quad . \quad (7.4)$$

Кинематическая вязкость связана с динамической следующим соотношением

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad , \quad (7.5)$$

где ν – кинематическая вязкость, м²/с ;

μ – динамическая вязкость, Па с;

ρ – плотность жидкости, кг/м³ .

Вязкость среды существенно зависит от температуры.

Область существования того или иного режима движения определяется по значению критерия (числа) Рейнольдса

$$Re = \frac{\omega \cdot d \cdot \rho}{\mu} = \frac{\omega \cdot d}{\nu} \quad , \quad (7.6)$$

где d – эквивалентный диаметр, м.

Для круглых труб, работающих полным сечением, эквивалентный диаметр равен их геометрическому диаметру. Для труб и каналов, сечение которых не является круглым, а имеет произвольную форму, эквивалентный диаметр находят как частное от деления учетверенной площади поперечного сечения потока на смоченный периметр.

Если $Re \leq 2320$, то имеет место ламинарный режим движения;

при $Re \geq 10000$ – турбулентный режим;

при $2320 < Re < 10000$ наблюдается неустойчивый, преимущественно турбулентный режим, который называют переходным.

В гидродинамических расчетах широко используется уравнение Бернулли, которое, по сути, является выражением частного случая закона сохранения энергии. Для идеальной жидкости (жидкости, вязкость у которой отсутствует) *уравнение Бернулли* имеет вид:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{\omega_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{\omega_2^2}{2g}, \quad (7.7)$$

где

z_1 z_2 – геометрическая высота, соответственно для первого и второго сечения потока, м;

p_1 p_2 – гидростатическое давление, соответственно в первом и втором сечениях, Па;

ω_1 ω_2 – скорость жидкости в первом и втором сечениях, м/с;

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

Геометрическую высоту центра сечения струйки потока над плоскостью сравнения называют также геометри-

ческим напором. По существу, геометрический напор представляет собой потенциальную энергию положения.

Второе слагаемое

$$\frac{p}{\rho \cdot g}$$

представляет собой высоту, показываемую пьезометром, и называется пьезометрической высотой или пьезометрическим напором. Пьезометрический напор – это удельная потенциальная энергия давления.

Третье слагаемое

$$\frac{\omega_1^2}{2g}$$

называют скоростным или динамическим напором, который равен кинетической энергии единицы веса жидкости.

Ниже на рисунке представлена геометрическая интерпретация уравнения Бернулли для идеальной жидкости. Поскольку сумма всех трех напоров (высот) (геометрического, пьезометрического и скоростного) для идеальной жидкости одинакова по всей длине потока, то вершины отрезков, представляющих эту сумму, для любого сечения лежат в одной горизонтальной плоскости $M - M$, на высоте H_{20} от плоскости сравнения $0 - 0$. Величину H_{20} называют гидродинамическим напором, плоскость $M - M$ называют напорной плоскостью, а линию MM – напорной линией.

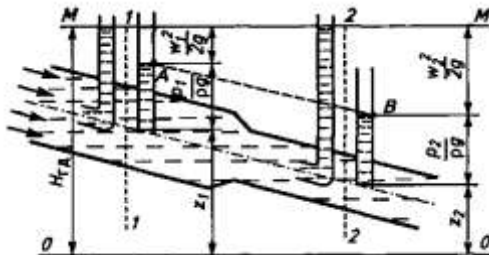


Рис. 7.2. Геометрическая интерпретация уравнения Бернулли

Линия AB , соединяющая уровни в пьезометрах называется пьезометрической линией.

В реальной жидкости существуют потери энергии из-за наличия внутреннего трения, трения о стенки труб, а также затрат на преодоление местных сопротивлений (сужений, поворотов и т.д.). В этом случае **уравнение Бернулли** приобретает вид:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha_1 \cdot \omega_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha_2 \cdot \omega_2^2}{2g} + h_n, \quad (7.8)$$

где в дополнение к ранее введенным обозначениям

α_1 α_2 – коэффициенты, учитывающие неравномерность распределения скорости по поперечному сечению потока ($\alpha \approx 2$ – для ламинарного режима движения и $\alpha \approx 1,05 \dots 1,1$ – для турбулентного режима);

h_n – потери напора, затраченные на преодоление гидравлических сопротивлений на участке между сечениями, m .

Величина h_n представляет собой потерянный напор, поэтому общий гидродинамический напор будет постоянно уменьшаться по длине потока, то есть напорная линия MM становится наклонной по отношению к плоскости сравнения.

В инженерной практике часто приходится рассматривать истечение жидкости через отверстия в днищах и стенках аппаратов. Задачи определения скорости истечения через отверстия и насадки решают с использованием уравнения Бернулли. При истечении жидкости через незатопленное отверстие в тонкой стенке скорость жидкости в поперечном сечении отверстия и объемный секундный расход

определяются по формулам:

$$\omega_0 = \varepsilon \cdot \varphi \sqrt{2gH} = \alpha \sqrt{2gH}; \quad (7.9)$$

$$V = S_0 \cdot \omega_0 = S_0 \cdot \alpha \sqrt{2gH}, \quad (7.10)$$

где

ω_0 – скорость жидкости в поперечном сечении отверстия, $м/с$;

ε – коэффициент сжатия струи, зависящий от числа Рейнольдса;

φ – коэффициент скорости, характеризующий уменьшение действительной скорости по сравнению с теоретической;

α – коэффициент расхода, $\alpha = \varepsilon \cdot \varphi$;

g – ускорение свободного падения, $м/с^2$;

H – уровень жидкости над отверстием (напор), $м$;

V – расход жидкости, $м^3/с$.

При истечении через затопленное отверстие (жидкость перетекает в смежный заполненный резервуар) формула для расчета расхода имеет вид:

$$V = S_0 \cdot \alpha \sqrt{2g(H_1 - H_2)}, \quad (7.11)$$

где H_1 и H_2 – уровни жидкости в смежных резервуарах, $м$.

Для повышения расхода при истечении, увеличения или уменьшения скорости истечения струи используют насадки – короткие патрубки, присоединяемые к отверстиям. При этом используют цилиндрические, конические сходящиеся, конические расходящиеся и коноидальные насадки.

Цилиндрический и конический расширяющиеся насадки, вследствие создания вакуума в сужающейся части струи, увеличивают расход жидкости, но снижают скорость истечения. Сужающий конический насадок не увеличивает расход, но существенно увеличивает скорость истечения и дальнобойность струи. Коноидальный насадок наряду с увеличением расхода приводит к возрастанию скорости истечения.

Значения коэффициентов скорости, расхода и коэффициента сжатия струи для различных типов насадков можно найти в специальной литературе.

Одной из широко распространенных задач гидродинамики являются задачи расчета трубопроводов. При расчете трубопроводов для расчета потерь напора на участке трубопровода пользуются **формулой Дарси – Вейсбаха**

$$h_n = h_m + h_{\text{м}} = \left(\lambda \frac{l}{d_3} + \sum \zeta_i \right) \frac{\omega^2}{2g}, \quad (7.12)$$

где

h_n – общие потери гидродинамического напора на участке трубопровода, м;

h_m – потери на трение по длине трубопровода, м;

$h_{\text{м}}$ – потери гидродинамического напора в местных сопротивлениях (поворотах, сужениях и т.д.), м;

λ – коэффициент потерь на трение (коэффициент Дарси);

l – длина участка трубопровода, м;

d_3 – эквивалентный диаметр трубопровода, м;

ζ_i – коэффициент i -го местного сопротивления ;

ω – скорость жидкости, м/с;

g – ускорение свободного падения, м/с².

Значения коэффициента Дарси можно определить по эмпирическим формулам или графикам, приводимым в

специальной литературе, в зависимости от режима движения жидкости. Для ламинарного режима

$$\lambda = 64/Re . \quad (7.13)$$

В гидродинамике рассматривается такое явление как *гидравлический удар*, теория которого разработана отечественным ученым Н.Е. Жуковским. Гидравлический удар проявляется как резкое повышение давления в трубопроводе при внезапном перекрытии трубопровода задвижкой или клапаном, внезапной остановке насоса, перекачивающего жидкость. Скачки давления при этом могут в десятки и сотни раз превышать обычное давление в трубопроводе. Естественно, что гидравлический удар может стать причиной разрушения трубопровода, поломки насосов и повреждения арматуры. Гидравлический удар бывает *полным*, когда происходит полный останов движения, или *неполным*, когда начальная скорость ω_0 падает до некоторого значения ω_1 , что имеет место, например, при частичном перекрытии запорного устройства. Повышение (заброс) давления при гидравлическом ударе определяют по формулам Н.Е. Жуковского:

при полном ударе

$$\Delta p = \rho \cdot c \cdot \omega_0 \quad (7.14)$$

при неполном ударе

$$\Delta p = \rho \cdot c (\omega_0 - \omega_1) , \quad (7.15)$$

где

ρ – плотность жидкости, $кг/м^3$;

c – скорость распространения ударной волны, которая также может быть рассчитана по формуле Жуковского, $м/с.$, приводимой в специальной литературе.

7.4. Краткие сведения о насосах

Жидкости в трубопроводах и аппаратах перемещаются под действием разности давлений, например, в начале и в конце трубопровода. Для перемещения жидкости с низшего уровня на высший используют насосы, которые сообщают жидкости потенциальную энергию давления.

Насос — это гидравлическая машина, которая преобразует механическую энергию двигателя в энергию перемещаемой жидкости.

7.4.1. Классификация насосов

По принципу действия различают насосы **объемные, лопастные (центробежные), вихревые и осевые**.

Работа объемных насосов основана на вытеснении жидкости из замкнутого пространства вращающимися или движущимися возвратно-поступательно телами. К объемным относятся поршневые, ротационные, винтовые, шестеренные и пластинчатые насосы.

В центробежных насосах давление создается центробежной силой, возникающей при вращении лопастных колес в корпусе насоса.

В вихревых насосах жидкость перекачивается за счет энергии вихрей, образующейся при интенсивном возникновении и разрушении вихрей во время вращения рабочих колес.

7.4.2. Основные параметры насосов

Основными параметрами насосов являются **подача, напор и потребляемая мощность**.

Подача (производительность) V , $\text{м}^3/\text{с}$ — это объемный расход жидкости, подаваемой насосом в нагнетательный трубопровод.

Напор насоса H , m — удельная энергия, сообщаемая насосом единице веса перекачиваемой жидкости.

Полезная мощность N_n , Bt — затрачиваемая на создание в жидкости потенциальной энергии давления и равна произведению массового расхода жидкости на напор:

$$N_n = \rho \cdot g \cdot V \cdot H. \quad (7.16)$$

Чтобы определить мощность на валу насоса N_e , следует полезную мощность разделить на КПД насоса η_n , который характеризует потери энергии в насосе:

$$N_e = N_n / \eta_n \quad (7.17)$$

Потери энергии в насосе зависят от совершенства конструкции, экономичности эксплуатации и изношенности насоса:

$$\eta_n = \eta_v \cdot \eta_z \cdot \eta_m,$$

где

η_v — коэффициент подачи, учитывающий потери производительности при утечках жидкости через клапаны, сальники, зазоры и представляет собой отношение действительной подачи к теоретической;

η_z — гидравлический КПД, представляющий собой отношение действительного напора насоса к теоретическому;

η_m — механический КПД, характеризующий потери мощности на механическое трение в подшипниках, сальниках и других элементах насоса.

КПД насоса η_n в среднем составляет для поршневых 0,8.. 0,9, для центробежных — 0,7.. 0,95.

Для сжатия и транспортирования газов и паров используются компрессоры, которые преобразуют механиче-

скую энергию приводящего двигателя в энергию сжатого газа (чаще всего воздуха). По принципу действия компрессоры делят на две группы: объёмные и лопастные. К первой группе относятся поршневые и ротационные компрессоры, ко второй – центробежные и осевые.

Основными параметрами компрессора являются степень повышения давления, производительность, КПД и мощность, затрачиваемая на привод компрессора.

7.5. Распыление жидкости

При проведении многих производственных процессов возникает необходимость диспергировать жидкость (распределить в мелкодисперсном состоянии) в газовой среде. Примерами таких процессов могут служить производство сухого молока в распылительных сушилках, увлажнение воздуха в распылительных камерах и т.п.

Существуют следующие виды распыливания жидкости: гидравлический, механический, пневматический, электрический, ультразвуковой, пульсационный. При этом наибольшее распространение в технологиях переработки получили три первых метода и применяемые для этой цели устройства могут быть разбиты на три основные группы:

- Распылительные форсунки механического типа;
- Пневматические форсунки, работающие при помощи сжатого воздуха или пара;
- Центробежные распылители.

В форсунках механического типа распыливание жидкости происходит при прохождении потока жидкости, поступающей через отверстие малого сечения. Движущаяся с высокой скоростью струя разбивается на капли при соприкосновении с покоящимся газом под действием сил инерции, поверхностного натяжения и вязкости. Струе в форсунке может придаваться вращательное движение. Меха-

нические форсунки используются для распыления мало-вязких жидкостей, например воды.

Размеры капель зависят от многих факторов: давления, размеров отверстия и формы каналов, параметров жидкости и в первую очередь вязкости и составляют обычно 0,05...0,15 мкм.

Расход воды при работе механических форсунок

$$m = Kdp^n, \text{ кг/ч}, \quad (7.18)$$

где K – коэффициент, зависящий от конструкции форсунки ($K=30...50$);

d – диаметр выходного отверстия, мм;

p – избыточное давление воды, Па;

n – показатель степени, зависящий от типа форсунки.

В пневматических форсунках распыление поступающей жидкости производится воздухом, подающимся под давлением (1,5...5) Бар 0,15...0,5 МПа в кольцевой канал форсунки. Расход сжатого воздуха определяется свойствами распыляемой жидкости конструкции форсунки и составляет 0,3...0,6 м³ (приведённого к нормальным условиям) на 1 кг жидкости.

Пневматическим способом могут распыляться вязкие жидкости и суспензии.

В центробежных распылителях жидкость подаётся на быстровращающийся диск. Центробежной силой жидкость подаётся к краям диска и разбрызгивается.

Механизм образования капель при центробежном распылении зависит от интенсивности потока и частоты вращения диска. При малых окружных скоростях распыление получается неоднородным, поэтому $\omega_{min}=60$ м/с. Частота вращения 4 000...20 000 об/мин. При малых подачах жидкость растекается тонкой плёнкой по диску и, переливаясь через край, разрывается и образует капли. При больших

подачах жидкости образуются отдельные струйки, которые распадаются на некотором расстоянии от диска.

При дальнейшем увеличении подачи, струйки сливаются в сплошную плёнку, которая также распадается на некотором расстоянии от края диска.

Распыляющие диски могут быть сплошными (для грубых суспензий) или с канавками или лопатками (радиальными) (для тонких суспензий и однородных жидкостей).

Центробежное распыливание имеет большие преимущества в силу простоты конструктивного осуществления и возможности распыления не только вязких жидкостей, но также кашеобразных и пастообразных масс.

7.6. Барботаж

Барботажем называется процесс прохождения газа или пара в жидкости независимо от технических целей этой операции. Область применения барботажа весьма обширна. Барботаж применяется в различных аппаратах, где требуется привести в контакт газ или пар с жидкостью. Аппараты, применяемые с этой целью, называются барботерами.

Применяются следующие основные типы барботеров:

- колпачковый;
- ситчатый;
- радиальный;
- решётчатый.

Во всех типах барботеров газ подается через отверстия на нижний уровень слоя жидкости, через которую он и проходит, поднимаясь вверх в виде отдельных пузырьков или струй.

Характер протекания барботажного процесса зависит от расхода (скорости истечения) газа. При малых расходах

(малой скорости) имеет место пузырьковый режим, при больших расходах – струйный. При наступающем при больших скоростях истечения газа струйном режиме на выходе из отверстия газовый поток образует «факел» большей или меньшей величины. При небольшой высоте слоя жидкости этот факел прорывается на поверхность.

Большинство барботеров имеют тарелочную конструкцию, когда рабочий объём аппарата разбивается на секции перегородками – тарелками.

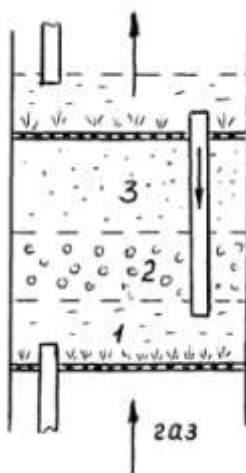


Рис. 6.3. Схема барботажного процесса при струйном режиме

При интенсивном струйном режиме барботаж наблюдаются три зоны: барботаж, пены и брызг, как это показано на рисунке. При малых объёмных расходах газа (скоростях) большая часть жидкости находится в зоне барботаж – 1. При увеличении скорости возрастает количество жидкости в двух верхних зонах (пены – 2 и брызг – 3).

При дальнейшем повышении скорости структура пены становится подвижной и в неё проникают пузыри и струи газа. Пена приобретает структуру динамически устойчивого подвижного слоя. Такой режим работы барботера называют пенным режимом. Пенный режим имеет место при скорости газа в свободном сечении аппарата 1...3 м/с. Динамически устойчивая подвижная пена обеспечивает хороший контакт жидкости и газа и способствует повышению эффективности работы аппаратов.

При больших скоростях газа и малых расстояниях между тарелками часть жидкости в виде брызг и элементов пенной структуры переносится навстречу основному потоку жидкости (уменьшая расход).

Для уменьшения брызгоуноса необходимо увеличивать межтарелочное пространство или применять механические паросепарационные устройства, простейшим типом которых являются отбойники жалюзийного типа.

7.7. Течение двухфазных систем в каналах

В ряде аппаратов (например в выпарных аппаратах) осуществляется течение двухфазных систем (жидкость – газ или жидкость – пар) в вертикальных трубах, когда вследствие разной плотности жидкость и газ движутся навстречу друг другу. При этом могут наблюдаться наряду с пузырьковым режимом и другие формы течения: снарядное, кольцевое и дисперсное. Вид определяется расходом фаз и свойствами жидкости и газа.

Снарядное течение характеризуется последовательным прохождением по каналу (трубе) больших пузырей газа (пара) образующихся при агломерации пузырьков, и занимающих почти всё поперечное сечение трубы.

При увеличении газо- и паросодержания происходит смена режима течения – возникает кольцевой режим тече-

ния, когда жидкость распределяется по стенкам, а поток газа по центру канала. Если в ядре потока содержится значительное количество влажного пара, то такой режим называется дисперсно-кольцевым.

При дисперсном режиме вся жидкость полностью распределена в газовой среде.

Как разновидность кольцевого режима можно рассматривать пленочное движение жидкости, когда она в виде тонкого слоя (пленки) движется по вертикальной поверхности. Пленочное движение жидкости под действием силы тяжести в неподвижной газовой среде или газовой среде, движущейся с небольшой скоростью, является ламинарным. Такая пленка называется падающей.

Для пленочного течения жидкости вводится понятие линейной плотности орошения, под которой понимают отношение массового расхода жидкости к периметру поверхности, по которой движется пленка

$$\Gamma = \frac{G}{P} = \frac{P \cdot \delta \cdot v \cdot \rho_{жс}}{P} = \delta \cdot v \cdot \rho_{жс} , \quad (7.19)$$

где

Γ – линейная плотность орошения, $кг/м \cdot с$;

G – массовый расход жидкости, $кг/с$;

P – периметр поверхности, $м$;

δ – толщина пленки, $м$;

v – средняя скорость движения пленки $м/с$;

$\rho_{жс}$ – плотность жидкости, $кг/м^3$.

По значению линейной плотности орошения можно найти толщину пленки

$$\delta = \frac{\Gamma}{v \cdot \rho_{жс}} \quad (7.20)$$

и среднюю скорость движения пленки

$$v = \frac{\Gamma}{\delta \cdot \rho_{ж}} . \quad (7.21)$$

7.8. Краткие сведения о неньютоновских жидкостях

Приведенные выше соотношения в основном отражают поведение ньютоновских жидкостей, для которых выполняется закон вязкого трения Ньютона

$$\tau = -\mu \cdot \nabla \omega , \quad (7.22)$$

где

τ – напряжение сдвига между слоями жидкости, Па;

μ – динамическая вязкость, Па с;

$\nabla \omega$ – градиент скорости в направлении по нормали к направлению потока.

В пищевой технологии нередко приходится иметь дело с текучими средами, для которых наблюдается отклонение от закона внутреннего трения Ньютона (густые суспензии, пасты, патоки и т.д.). Такие среды называют неньютоновскими жидкостями.

В свою очередь, в зависимости от характера отклонения от закона внутреннего трения Ньютона неньютоновские жидкости делятся на три группы:

1. Вязкие стационарные неньютоновские жидкости, для которых зависимость напряжения сдвига от градиента скорости не изменяется во времени.

Среди них в свою очередь выделяют

а) бингамовские пластические жидкости (пасты, густые суспензии) для которых

$$\tau = \tau_0 + \mu_n \nabla \omega , \quad (7.23)$$

где

τ_0 – начальное напряжение сдвига (предел текучести) Па
 μ_n – пластическая вязкость (аналог динамической вязкости);

б) псевдопластические (растворы полимеров)

$$\tau = k(\nabla \omega)^m , \quad (7.24)$$

где m, k – опытные константы, $0 < m < 1$;

в) дилатантные (суспензии большой концентрации)

$$\tau = k(\nabla \omega)^m , \quad m > 1.$$

2. Нестационарные неньютоновские жидкости,
 для которых напряжение сдвига вязкости определяется не только градиентом скорости, но и временем действия силы (течения).

Среди них выделяют

а) тиксотропные жидкости

(простокваша, кефир, краски), структура которых под действием напряжения постепенно разрушается и сопровождается уменьшением вязкости (например, взбалтывание кефира), но может восстановиться после снятия напряжения.

б) реопектантные жидкости

вязкость возрастает по мере действия постоянного напряжения.

3. Вязкоупругие, максвелловские жидкости

(смола, тесто и др.), которые текут под воздействием напряжения сдвига, а после снятия напряжения частично восстанавливают свою форму, подобно упругим твёрдым телам.

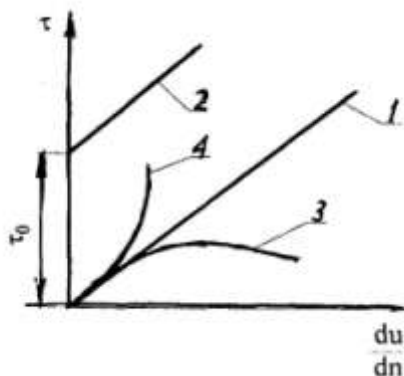


Рис. 7.4. Качественные реологические характеристики жидкостей:

- 1 — ньютоновская жидкость; 2 — бингамовская жидкость;
- 3 — псевдопластическая жидкость; 4 — дилатантная жидкость

При рассмотрении поведения неньютоновских жидкостей в гидромеханических процессах вводится понятие о кажущейся вязкости. Под кажущейся вязкостью понимают такую вязкость ньютоновской жидкости, при которой скорость деформации этой жидкости и рассматриваемой неньютоновской жидкости под действием заданного напряжения будут одинаковы.

В связи с тем, что неньютоновские жидкости имеют большие значения кажущейся вязкости для них характерно ламинарное движение практически при любых перепадах давления, которые имеют место в аппаратах, в которых обрабатываются неньютоновские жидкости. Течение и деформации неньютоновских жидкостей является предметом изучения науки — реологии.

Тестовые контрольные вопросы и задания

1. Что собой представляет гидростатика? 2. Что собой представляет гидродинамика? 3. Что такое капельная жидкость? 4. Что собой представляет идеальная жидкость? 5. В чем состоит основное отличие газов от капельной жидкости? 6. Что такое гидростатическое давление? 7. Какова природа и основная особенность давления в жидкостях и газах? 8. Назовите приборы для измерения давления. 9. Что такое динамическая вязкость? 10. Что такое кинематическая вязкость? 11. Приведите математическое выражение основного закона гидростатики? 12. Дайте формулировку основного закона гидростатики? 13. Назовите режимы движения жидкости. 14. Что собой представляет ламинарный режим движения жидкости, и при каких условиях он существует? 15. Что собой представляет турбулентный режим движения жидкости, и при каких условиях он существует? 16. Что собой представляет переходный режим движения жидкости и при каких условиях он существует? 17. Напишите выражение числа Рейнольдса? 18. Приведите уравнение Бернулли для реальной жидкости. 19. Каковы составляющие потерь напора при течении жидкости в трубах? 20. Для чего служат насосы, назовите основные типы насосов. 21. Назовите способы распыливания жидкостей. 22. Назовите основные типы распылителей. 23. Что собой представляет барботаж. 24. Назовите виды течения двухфазных систем в вертикальных каналах и укажите их отличительные особенности. 25. Назовите три группы неньютоновских жидкостей и укажите их отличительные особенности.

8. Гидромеханические процессы

8.1. Краткие сведения о гидрохимических процессах

Гидромеханические процессы – процессы, протекающие в жидких и газообразных средах или системах, и основой которых является движение в этих средах. Протекание гидромеханических процессов определяется законами механики и гидромеханики. К основным гидромеханическим процессам относятся:

- перемешивание жидких сред и пластических масс;
- разделение неоднородных жидких и газовых систем;
- псевдооживление.

8.2. Общие сведения о процессах перемешивания

Перемешивание – процесс многократного перемещения частиц неоднородной среды друг относительно друга во всем объеме аппарата. Перемешивание осуществляется для выравнивания параметров среды (температуры, концентрации) по объему аппарата, интенсификации процессов тепло- и массообмена, образования эмульсий и суспензий, а также для придания однородности пластическим массам и смесям сыпучих материалов.

Процесс перемешивания имеет свои особенности в зависимости от области его применения: перемешивание в жидкой среде; перемешивание пластичных масс; перемешивание сыпучих материалов.

В зависимости от источника побудительных сил при перемешивании различают следующие виды перемешивания:

- механическое перемешивание;
- поточное перемешивание;
- пневматическое перемешивание.

Механическое перемешивание осуществляется при помощи механизмов – мешалок.

Поточное перемешивание производится путем перемешивания жидких потоков в специальных смесителях.

Пневматическое перемешивание происходит за счет энергии газовых или паровых струй, поступающих в жидкую среду.

Эффективность процесса перемешивания при образовании суспензий и эмульсий, а также осуществляемого для получения однородных смесей может оцениваться **коэффициентом неоднородности смеси**

$$\beta = \frac{1}{nC_{cp}} \sum_{i=1}^n |C_i - C_{cp}| ,$$

где

n – число точек измерения концентрации;

C_{cp} – средняя концентрация рассматриваемого компонента в смеси;

C_i – концентрация компонента в пробе.

Идеальному перемешиванию соответствует $\beta = 0$ для всех компонентов.

Эффективность перемешивания, осуществляемого для интенсификации теплообменных и массообменных процессов, можно оценить отношением коэффициентов тепло- и массоотдачи при перемешивании и без него.

Интенсивность перемешивания определяется временем достижения требуемого технологического результата или числом оборотов мешалки при фиксированной продолжительности перемешивания. Интенсификация процессов перемешивания приводит к уменьшению размеров

проектируемой аппаратуры и повышению производительности процессов перемешивания.

Большое значение в процессах перемешивания имеет энергоемкость процессов. В частности, одним из основных вопросов при расчете мешалок является определение мощности привода.

8.3. Оборудование для перемешивания жидкостей

Для перемешивания жидких сред в основном применяется механическое перемешивание, то есть используются мешалки различных типов. Все применяемые мешалки делят на быстроходные и тихоходные.

Быстроходные мешалки работают при турбулентном и переходном режимах движения жидкости, а тихоходные – при ламинарном режиме. При ламинарном режиме перемешивания ($Re_m < 30$) жидкость плавно обтекает лопасти мешалки и вращается вместе с ними. При этом перемешиваются только те слои жидкости, которые непосредственно примыкают к лопастям мешалки. При $Re_m > 10^5$ имеет место развитый турбулентный режим, когда перемешивание носит более интенсивный характер. После достижения такого режима дальнейшее увеличение оборотов часто оказывается нецелесообразным, поскольку хотя и приводит к более интенсивному перемешиванию, но возрастание затрат мощности на привод не компенсируется достигаемым эффектом.

По своему устройству мешалки делят на четыре основные группы:

- лопастные;
- пропеллерные;
- турбинные;
- специальные.

Ниже на рисунке представлены схемы основных типов мешалок для жидких сред. В зависимости от конструкции мешалки при работе создают в аппарате потоки жидкости различного характера: тангенциальные, радиальные, осевые и смешанные. При тангенциальном течении жидкость в аппарате движется преимущественно по концентрическим окружностям, параллельным плоскости вращения мешалки. Перемешивание происходит за счет вихрей, возникающих на кромках мешалки. Качество перемешивания будет наихудшим, когда скорость вращения жидкости равна скорости вращения мешалки. Установка отражательных перегородок способствует образованию вихрей, увеличению турбулизации и улучшению перемешивания. Радиальное течение характеризуется направленным движением жидкости от центра к стенкам аппарата перпендикулярно оси вращения мешалки. Осевое течение направлено вдоль оси вращения.

Лопастные мешалки в зависимости от вязкости среды, для которых они применяются, могут иметь несколько рядов лопастей, а также иметь отражатели или перегородки. Обычно частота вращения лопастных мешалок лежит в пределах $30 \dots 90 \text{ мин}^{-1}$, а окружная скорость на концах лопастей для вязких жидкостей составляет $2 \dots 3 \text{ м/с}$. Основное достоинство лопастных мешалок – простота устройства, однако они не обеспечивают хорошего перемешивания, особенно в направлении перпендикулярном плоскости лопасти. Для улучшения перемешивания лопасти могут устанавливаться под углом до 30° к оси вала, что создает осевой поток в объеме смесителя.

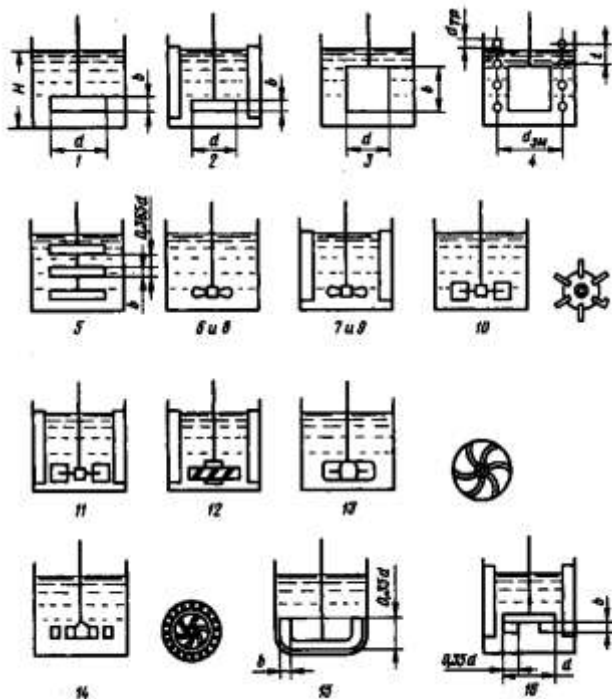


Рис. 8.1. Схемы мешалок для жидких сред:

1 – двухлопастная; 2 – двухлопастная с перегородками; 3 – двухлопастная без перегородок; 4 – двухлопастная со змеевиком; 5 – шестилопастная; 6, 8 – пропеллерная; 7, 9 – пропеллерная с перегородками; 10 – турбинная открытая с шестью лопатками; 11 – турбинная открытая с шестью лопатками с перегородками; 12 – турбинная открытая с восемью лопатками с перегородками; 13 – закрытая турбинная с шестью лопатками; 14 – закрытая турбинная с шестью лопатками и направляющим аппаратом; 15 – якорная; 16 – дисковая с шестью лопатками

Примечание. Мешалки 8 и 9 отличаются соответственно от мешалок 6 и 7 удвоенным шагом винта.

Якорные мешалки имеют лопасть по форме днища, и их применяют для перемешивания вязких сред, образующих осадок.

Пропеллерные и турбинные мешалки относятся к быстроходным, их частота вращения составляет 200...3000 мин^{-1} при окружной скорости до 20 м/с . Они являются более эффективными, чем лопастные, благодаря созданию интенсивных вертикальных токов, но требуют и больших затрат мощности на привод. Рабочим органом пропеллерных мешалок является винт диаметром от 1/4 до 1/3 диаметра аппарата, а у турбинных – открытое или закрытое турбинное колесо. Действие турбины аналогично действию рабочего колеса центробежного насоса. Турбинные мешалки применяются для перемешивания жидких сред как малой, так и большой вязкости (до 500 $\text{Па}\cdot\text{с}$), а также взмучивания осадков с содержанием твердой фазы до 60 %.

К специальным мешалкам относят дисковые, шнековые, ленточные, винтовые и др. Эти мешалки, как правило, являются тихоходными и применяются для перемешивания вязких сред.

Для смешивания маловязких жидкостей применяется поточное перемешивание в статических смесителях, простейшими из которых являются устройства с винтовыми вставками различных конструкций (рис 8.2.).

Поточные смесители могут также представлять собой вертикальные емкости с перегородками в виде тарелок. Смешиваемые жидкости подаются в верхнюю часть смесителя и стекают вниз под действием сил гравитации. Растекаясь по перегородкам, жидкости перемешиваются между собой.

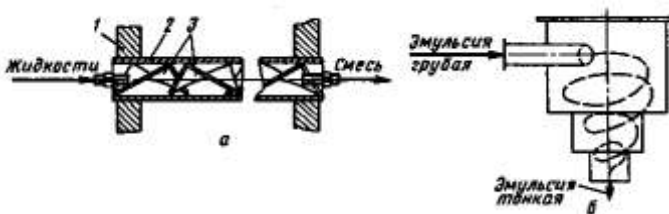


Рис. 8.2. Схемы статических смесителей:
а – цилиндрический со вставными элементами: 1 – фланец;
 2 – корпус; 3 – смешивающие элементы; *б* – эмульсор

Пневматическое перемешивание заключается в барботировании – пропускании газа или пара через слой перемешиваемой среды. Аппарат для барботирования – барботер представляет собой расположенные на дне емкости перфорированные трубы, в которые под давлением подается газ или пар (рис.8.3.).



Рис. 8.3. Схема пневматического смесителя (барботера):
 1 – корпус; 2 – барботер

Другой способ пневматического перемешивания – эрлифтный заключается в том, что сжатый газ подают в циркуляционную трубу. Движущаяся вверх струя или пузырьки газа увлекают за собой жидкость, которая затем опускается вниз в кольцевом пространстве между трубой и

стенками аппарата, обеспечивая циркуляционное перемешивание жидкости.

8.4. Оборудование для перемешивания пластичных масс

При перемешивании пластичных масс, в частности при получении теста, не только осуществляется смешивание различных компонентов, но тесто при этом разминается, насыщается воздухом и приобретает механические новые свойства.

Смесители для пластичных масс бывают как периодического, так и непрерывного действия. Рабочие органы смесителей имеют шнековую, ленточную или лопастную конструкцию с вертикальной или горизонтальной осью вращения. В некоторых смесителях рабочий орган совершает сложное пространственное движение. Для обработки эластично-упругих масс (например, пшеничного теста) применяют смесители с двумя месительными органами, вращающимися навстречу друг другу с разными скоростями.

На рисунке 8.4 приведены схемы рабочих органов некоторых смесителей для пластичных масс, а на рисунке 8.5 – схема аппарата для приготовления теста пирожных.

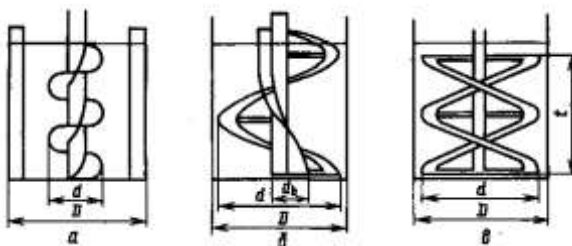


Рис. 8.4. Схемы мешалок для пластичных масс:

a – шнековая; *б, в* – ленточные

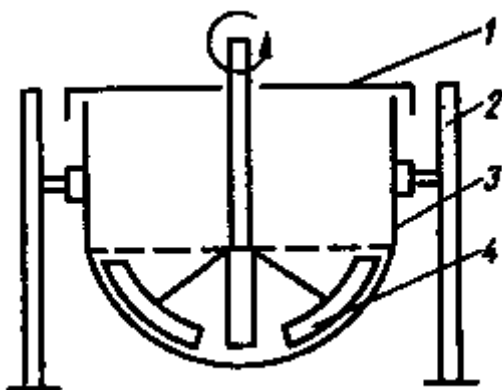


Рис. 8.5. Схема аппарата для приготовления теста:

- 1 – крышка; 2 – стойка; 3 – корпус;
4 – месительное устройство

На рисунке 8.6 приведена схема смесителя непрерывного действия с комбинированным рабочим органом.

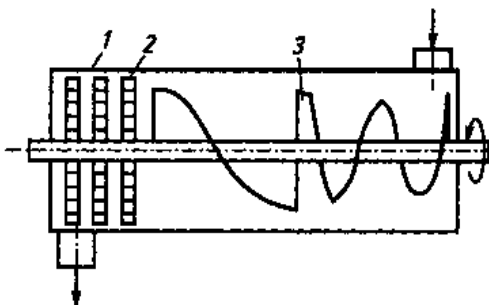


Рис. 8.6. Схема смесителя непрерывного действия:

- 1 – корпус; 2 – лопасти; 3 – шнек

8.5. Элементы расчета мешалок

Основным вопросом при расчете мешалок является определение мощности на привод мешалки. Для решения этого вопроса используется теория подобия. При этом процесс перемешивания описывают критериальным уравнением вида:

$$Eu_m = c Re_m^k, \quad (8.1)$$

где

Eu_m – критерий Эйлера модифицированный;

Re_m – модифицированный критерий Рейнольдса;

c и k – коэффициент и показатель степени, которые определяются экспериментально для каждого типа мешалок.

В свою очередь модифицированный критерий Эйлера представляет собой выражение:

$$Eu_m = \frac{N}{\rho \cdot n^3 \cdot d^5}, \quad (8.2)$$

а модифицированный критерий Рейнольдса –

$$Re_m = \frac{n \cdot d^2 \cdot \rho}{\mu}. \quad (8.3)$$

В этих выражениях

N – затрачиваемая мощность на перемешивание, Вт;

ρ – плотность среды, $кг/м^3$;
 n – частота вращения вала, $с^{-1}$;
 d – диаметр мешалки, $м$;
 μ – динамическая вязкость жидкости, $Па \cdot с$.

При расчете мешалок можно значение Eu_m найти по графику $Eu_m = f(Re_m)$ [1, 2] , задав предварительно n , d и рассчитав Re_m . По найденному значению модифицированного критерия Эйлера определяют затраты мощности на перемешивание

$$N = Eu_m \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d^5 .$$

Мощность двигателя на привод мешалки определяют с учетом его КПД и с запасом на перегрузку в период пуска. Коэффициент запаса принимают равным 1,5 для лопастных мешалок и 1,1...1,15 – для пропеллерных и турбинных. При этом двигатель должен обладать большим пусковым моментом.

Иногда потребляемую мощность на перемешивание рассчитывают по эмпирическим формулам, конкретный вид которых зависит от типа мешалки и ее геометрических параметров. В этих формулах учитывается также частота вращения вала и динамическая вязкость жидкости.

Тестовые контрольные вопросы и задания

1. С какой целью производится перемешивание?
2. Каким показателем оценивается качество перемешивания?
3. Назовите три вида перемешивания в зависимости от источника побудительных сил.
4. В чем особенность механического перемешивания?
5. В чем особенность пневматического перемешивания?
6. В чем особенность

поточного перемешивания? 7. Назовите четыре группы мешалок для жидкостей, на которые они делятся по своему устройству. 8. Назовите основные виды лопастных мешалок. 9. Назовите достоинства и недостатки лопастных мешалок. 10. Назовите преимущества и недостатки пропеллерных мешалок по сравнению с лопастными. 11. Приведите критериальное уравнение, используемое при расчете мешалок. 12. Приведите выражение модифицированного критерия Эйлера. 13. Приведите выражение модифицированного критерия Рейнольдса. 14. Как рассчитывается мощность на привод мешалки по модифицированному критерию Эйлера? 15. Назовите виды мешалок для пластических материалов в зависимости от основного рабочего органа? 16. В каких случаях применяются поточные смесители? 17. Что собой представляют поточные смесители?. 18. Что такое барботирование? 19. Что собой представляет барботер? 20. Что собой представляет эрлифтный способ перемешивания?

9. Процессы разделения неоднородных систем

9.1. Общие сведения о методах разделения неоднородных систем (НС)

Процессы разделения неоднородных систем (НС) широко применяются при переработке сельхозпродукции и в пищевых технологиях: выделение сахара из утфеля (упаренного раствора сахарного сиропа); освобождение пивного суслу от дробины; предварительное сгущение молока (сепарация); отделение продукта от агента сушки в распылительных сушилках и т.п.

Различают два основных метода разделения НС: ***осаждение*** и ***фильтрация***.

Осаждение – процесс, при котором частицы дисперсной среды движутся относительно дисперсионной (внешней) среды под действием какого либо силового поля (гравитационного, центробежного, электрического).

В зависимости от источника движущей силы различают осаждение:

- в гравитационном поле;
- в инерционном или центробежном поле;
- в электрическом поле.

Признаком, по которому происходит разделение в гравитационном и центробежном поле, является плотность компонентов неоднородной системы, в электрическом поле – электрический заряд частиц дисперсной среды.

Осаждение в гравитационном поле называют **отстаиванием**, а осаждение в центробежном поле с помощью центрифуг – **центрифугированием**.

Фильтрация – метод разделения, осуществляемый путем пропускания неоднородной среды через пористую перегородку (тело), которая задерживает взвешенные в жидкости или газе твердые частицы.

Движущей силой в процессе фильтрации является разность давлений на фильтрующей перегородке. В зависимости от способа создания давления на фильтрующей перегородке различают фильтрацию

- в гравитационном поле;
- в центробежном поле;
- в поле поверхностных сил давления (разности давлений, создаваемой насосом или компрессором).

9.2. Краткие сведения о кинетике осаждения

Скорость протекания процесса осаждения определяется скоростью движения частицы дисперсной среды. Движение частицы происходит под действием сил со сто-

роны силового поля (силы тяжести, сил инерции, электрического притяжения) и сил сопротивления движению. Скорость осаждения определяется из условия равновесия этих сил.

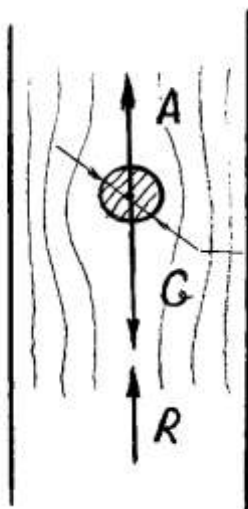


Рис. 9.1. Схема сил, действующих на частицу при отстаивании

При осаждении частиц в гравитационном поле (рис. 9.1) необходимо учитывать, что на частицу действуют сила тяжести G и архимедова сила (подъемная сила) A , действующие в противоположном друг другу направлении, а также сила гидравлического сопротивления. Расчет скорости осаждения ведется из условия равновесия указанных сил:

$$G - A = R \quad (9.1)$$

Для частиц сферической формы значения силы тяжести и архимедова сила находятся по формулам:

$$G = \frac{\pi \cdot d^3}{6} \rho_c g \quad (9.2)$$

$$A = \frac{\pi \cdot d^3}{6} \rho_c g \quad (9.3)$$

По закону вязкого трения Ньютона сила сопротивления движению

$$R = \xi \frac{\pi \cdot d^2}{4} \rho_c \frac{\omega_o^2}{2} \quad (9.4)$$

После подстановки значений в (9.1) получим формулу для скорости осаждения

$$\omega_o = \sqrt{\frac{4g \cdot d(\rho_c - \rho_c)}{3 \cdot \xi \cdot \rho_c}}, \text{ м/с}, \quad (8.5)$$

где

g – ускорение силы тяжести, м/с^2 ;

d – диаметр частицы, м ;

ρ_c – плотность частицы, кг/м^3 ;

ρ_c – плотность среды, кг/м^3 .

ξ – коэффициент сопротивления движению.

Коэффициент сопротивления зависит от режима движения и от вязкости среды. Режим движения частицы при ее осаждении определяется по числу Рейнольдса, которое в этом случае находится по формуле

$$\text{Re} = \frac{\omega_o d \cdot \rho_c}{\mu},$$

где ω_o – скорость осаждения, м/с;

d – диаметр частицы, м;

ρ_c – плотность среды, кг/м³.

μ – динамическая вязкость среды, Па · с.

Для ламинарного режима – $\text{Re} \leq 2$, а $\xi = \frac{24}{\text{Re}}$.

Для переходного режима – $500 \geq \text{Re} > 2$, а $\xi = \frac{18,5}{\text{Re}^{0,6}}$.

Для турбулентного режима – $\text{Re} > 500$, а $\xi = 0,44$.

Подставляя значение коэффициента для ламинарного режима в формулу (8.5), получим так называемое уравнение Стокса

$$\omega_o = \frac{g \cdot d^2 (\rho_v - \rho_c)}{18\mu}. \quad (9.6)$$

Формула (9.6) является математическим выражением закона Стокса, который гласит: при ламинарном движении

скорость осаждения частиц сферической формы пропорциональна квадрату их диаметра и обратно пропорциональна вязкости среды.

Скорость осаждения частиц неправильной формы меньше скорости осаждения шарообразных частиц. Влияние формы частиц на скорость осаждения учитывают введением поправочного коэффициента – коэффициента формы. При этом скорость осаждения определяют по формуле

$$\omega'_o = \psi \cdot \omega_o .$$

Коэффициент формы имеет значения: $\psi = 0,77$ – для частиц округлой формы; $\psi = 0,66$ – для угловатых частиц; $\psi = 0,58$ – для продолговатых частиц; $\psi = 0,43$ – для пластинчатых частиц.

При значительной концентрации взвешенных частиц имеет место стесненное отстаивание, при котором скорость отстаивания тоже снижается, что учитывается поправочным коэффициентом, значение которого зависит от концентрации частиц.

Расчет процесса осаждения можно производить с использованием критериального уравнения

$$Re = c \cdot (\psi \cdot Ar)^n , \quad (9.7)$$

где

c и n – коэффициент и показатель степени, определяемые экспериментально;

ψ – коэффициент формы;

Ar – критерий Архимеда.

Критерий (число) подобия Архимеда выражает соотношение подъемной силы, действующей на частицу и сил вязкого трения

$$Ar = \frac{g \cdot d^3 (\rho_c - \rho_c)}{\nu^2 \cdot \rho_c}, \quad (9.8)$$

где

g – ускорение силы тяжести, m/c^2 ;

d – диаметр частицы, m ;

ρ_c – плотность частицы, $кг/м^3$;

ρ_c – плотность среды, $кг/м^3$;

ν – кинематическая вязкость среды, $м^2 / с$.

Конкретный вид формулы (9.7) зависит от режима осаждения :

для ламинарного режима

$$Re = \frac{1}{18} \psi \cdot Ar \quad \text{при} \quad Re < 2 \quad \text{или} \quad \psi \cdot Ar < 36 ;$$

для переходного режима

$$Re = 0,152(\psi \cdot Ar)^{0,715} \quad \text{при} \quad 2 \leq Re < 500 \quad \text{или} \\ 36 \leq \psi \cdot Ar < 83 \cdot 10^3 ;$$

для турбулентного режима

$$Re = 1,74(\psi \cdot Ar)^{0,5} \quad \text{при} \quad Re > 500 \quad \text{или} \\ \psi \cdot Ar > 83 \cdot 10^3 .$$

Отстаивание протекает с низкими скоростями, особенно при малых размерах частиц и небольшой разнице в плотности частиц и среды. Существенно интенсифицировать процесс можно в инерционном поле центробежных сил, когда ускорение может значительно превышать ускорение силы тяжести. Важной характеристикой центробежного поля является *фактор разделения*, показывающий во сколько раз ускорение центробежных сил больше ускорения силы тяжести

$$F_p = \frac{\omega^2}{R \cdot g} , \quad (9.9)$$

где

ω – окружная скорость, м/с;

g – ускорение силы тяжести, м/с²;

R – радиус траектории частицы, м.

Формулу для расчета скорости осаждения в центробежном поле можно получить, подставив в (8.5) вместо ускорения силы тяжести величину центробежного ускорения. В результате имеем

$$\omega_o = \sqrt{\frac{4 \cdot d(\rho_c - \rho_s) \cdot \omega^2}{3 \cdot \xi \cdot \rho_s \cdot R}} , \text{ м/с} , \quad (9.10)$$

9.3. Оборудование для процессов осаждения

Оборудование для отстаивания и осаждения делится на отстойники, отстойные центрифуги, сепараторы и циклоны. Отстойники бывают периодического, полунепрерывного и непрерывного действия.

Простейшим отстойником полунепрерывного действия является представленный на рисунке 1 отстойник лоткового типа.

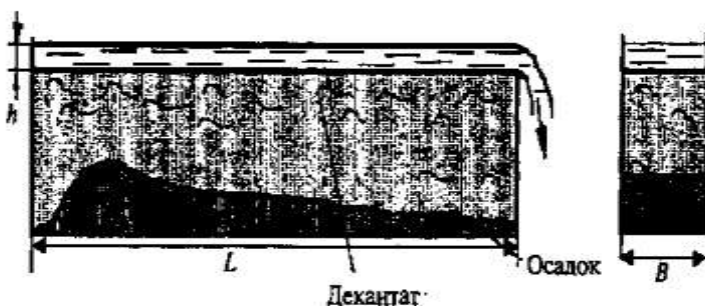


Рис. 9.2. Отстойник полунепрерывного действия лоткового типа

Суспензия непрерывным потоком подается в этот отстойник, и по мере движения по лотку взвешенные частицы оседают в виде шлама на дно лотка. Осветленная жидкость (*декантат*) сливается с другого конца лотка. По мере накапливания осадка (шлама) на дне, отстойник останавливают и шлам выгружают вручную

Более совершенным является отстойник полунепрерывного действия с наклонными перегородками (рис.9.3).

В отстойнике, показанном на рисунке 9.3, подаваемая через штуцер суспензия направляется с помощью наклонных перегородок попеременно сверху вниз и снизу вверх.

Наличие перегородок увеличивает площадь отстаивания и продолжительность пребывания суспензии в отстойнике. Шлам собирается в конических бункерах и периодически удаляется из них через краны.

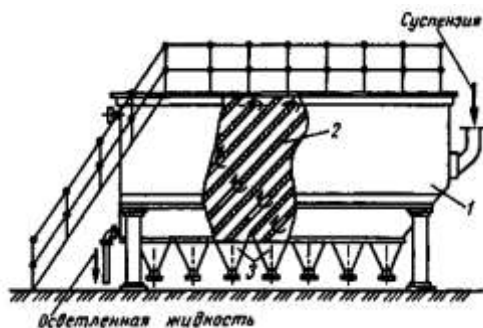


Рис. 9.3. Отстойник полунепрерывного действия с наклонными перегородками:

1 – корпус; 2 – наклонные перегородки; 3 – бункеры

Одноярусный отстойник непрерывного действия со скребковой мешалкой (рис. 9.4) представляет собой цилиндрический резервуар с коническим днищем и внутренним кольцевым желобом. В отстойнике установлена мешалка с наклонными лопастями, на которых расположены скребки для непрерывного перемещения осадка к разгрузочному отверстию. Мешалка вращается медленно, чтобы не нарушать процесс осаждения. Исходная суспензия непрерывно подается через трубу 5 в середину резервуара, а осветленная жидкость переливается в кольцевой желоб и отводится через штуцер 6.

Для уменьшения габаритов при большой площади поверхности отстаивания применяют многоярусные отстойники, которые представляют собой несколько отстойников, размещенных один над другим (рис. 9.5).

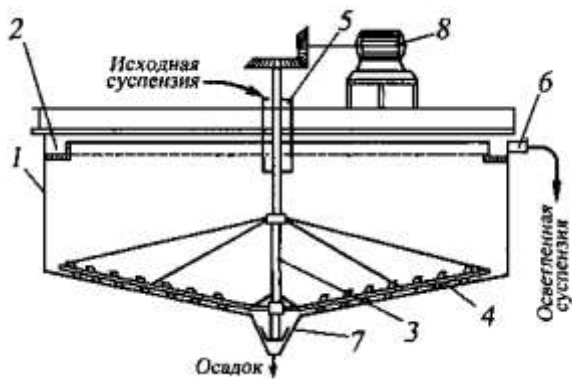


Рис. 9.4. Отстойник непрерывного действия со скребковой мешалкой:

- 1 – корпус; 2 – кольцевой жёлоб; 3 – мешалка; 4 – лопасти со скребками; 5 – труба для подачи исходной суспензии; 6 – штуцер для вывода осветлённой жидкости; 7 – разгрузочное устройство для осадка; 8 – электродвигатель

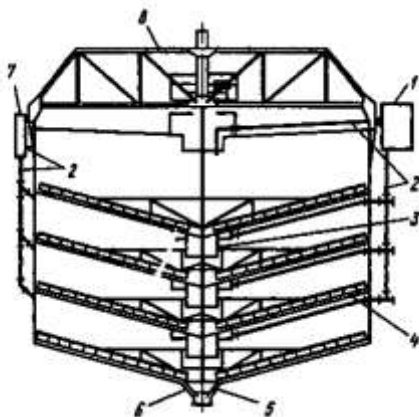


Рис. 9.5. Многоярусный отстойник

- 1 – распределительное устройство; 2 – трубы; 3 – стакан;
4 – гребковая мешалка; 5 – разгрузочный конус;
6 – скребок; 7 – коллектор; 8 – рама

Осаждение в центробежном поле происходит с помощью аппаратов двух типов: *центрифуг* и *циклонов*.

Центрифуги используются для разделения суспензий и эмульсий. В центрифугах вращательное движение разделяемой среде сообщается благодаря вращению рабочего органа – барабана, внутрь которого и подается разделяемая среда. Центрифуги в зависимости от значения фактора разделения F_p делят на нормальные центрифуги и сверхцентрифуги (ультрацентрифуги). Для нормальных центрифуг $F_p < 3000$ а для ультрацентрифуг – $F_p > 3000$. Центрифуги, использующиеся для разделения суспензий методом осаждения, называются осадительными или отстойными центрифугами. По режиму работы центрифуги делятся на аппараты периодического, полунепрерывного и непрерывного действия.

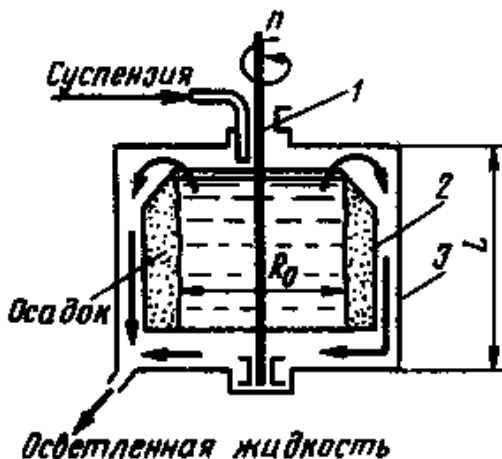


Рис. 9.6. Схема отстойной центрифуги:
1 – вал; 2 – барабан; 3 – корпус

В отстойной центрифуге полунепрерывного действия (рис.9.6) суспензия подается внутрь вращающегося барабана. Взвешенные в жидкости частицы, имеющие большую, чем у жидкой фазы плотность, центробежной силой отбрасываются к внутренней стенке барабана и осаждаются на ней. Осветленная жидкость (фугат) переливается через верхний край барабана и отводится из корпуса через штуцер. Периодически центрифугу останавливают для очистки барабана от скопившегося шлама.

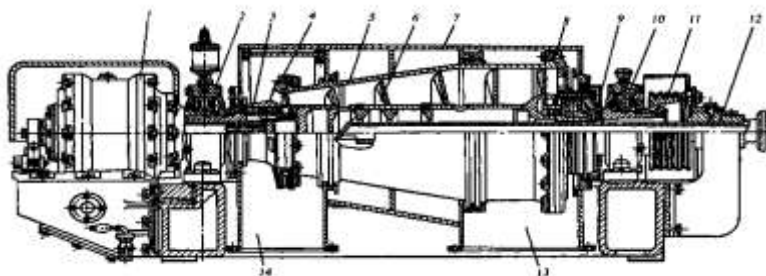


Рис. 9.7. Отстойная центрифуга непрерывного действия со шнековой выгрузкой осадка:

- 1 – редуктор; 2, 10 – подшипниковая опора;
 3, 9 – фланцы; 4, 8 – болты; 5 – ротор; 6 – шнек;
 7 – защитный кожух; 11 – шкив; 12 – питающая трубка;
 13 – приёмник фугата; 14 – приёмник осадка

В осадительной центрифуге непрерывного действия (рис. 9.7) непрерывное удаление дисперсной среды (осадка) происходит благодаря наличию внутри ротора (барабана) шнека, который вращается в ту же сторону, что и барабан, но с меньшей скоростью. Дисперсная среда шнеком продвигается в коническую часть ротора, где происходит отжим и уплотнение осадка и удаление его из ротора через выгрузочные окна. Осветленная жидкость (фугат) вытекает

в приемник через сливные отверстия в торце противоположной цилиндрической части ротора. Исходная суспензия поступает в ротор через питающую трубу в полном валу

Для разделения эмульсий применяют центрифуги, которые называют сепараторами. По величине фактора разделения большинство сепараторов относится к сверхцентрифугам. По технологическому назначению сепараторы делятся на три основных класса: *сепараторы-разделители*, применяемые для разделения смесей жидкостей, нерастворимых друг в друге, а также концентрирования суспензий и эмульсий; *сепараторы-осветлители*, предназначенные для очистки жидкости от взвешенных в ней твердых частиц; *комбинированные сепараторы*, служащие для выполнения двух или более операций по переработке жидких смесей. Сепараторы могут быть классифицированы по целому ряду конструктивных признаков и способов подвода исходной смеси и отвода фракций после разделения.

Широкое распространение получили тарельчатые сепараторы, ротор которых укомплектован пакетом конических тарелок, которые делят поток жидкости на параллельные тонкие слои. Рисунок 9.8 иллюстрирует принцип работы тарельчатых сепараторов.

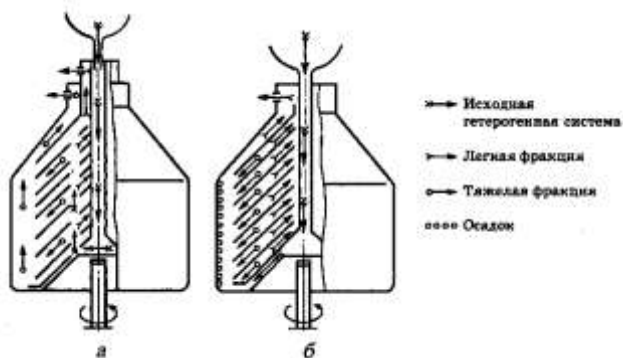


Рис. 9.8 Схема тарельчатых сепараторов:

а – разделитель; б – очиститель

Благодаря такой конструкции повышается производительность сепараторов и эффективность разделения.

Циклоны – устройства для разделения пылей и суспензий в центробежном поле, которые в отличие от центрифуг не имеют подвижных частей. Вихревое вращательное движение среды в этих аппаратах создается за счет соответствующего направления входящего в аппарат потока, как это показано на приведенной ниже схеме газового циклона.

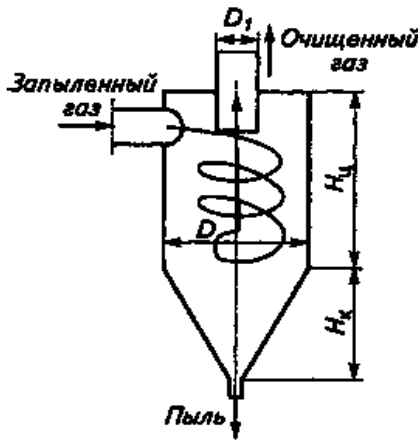


Рис. 9.9. Схема циклона

Показателем эффективности работы циклона служит степень очистки (КПД циклона)

$$\eta = \frac{m_{\text{ул}}}{m_{\text{н}}} 100\% , \quad (9.11)$$

где

$m_{\text{ул}}$ – массовый расход уловленных частиц, кг/с;

$m_{\text{н}}$ – массовый расход взвешенных частиц на входе, кг/с.

При больших расходах газа применяют батарейные циклоны (рис.9.10), которые состоят из достаточно большого числа параллельно установленных в общем корпусе циклонных элементов. Благодаря малому радиусу циклонных элементов, в них обеспечивается значительная центробежная сила и скорость осаждения частиц. При этом закручивающие устройства циклонных элементов могут иметь различную конструкцию. Батарейный циклон имеет общий подвод и отвод газов, а также общий сборный бункер.

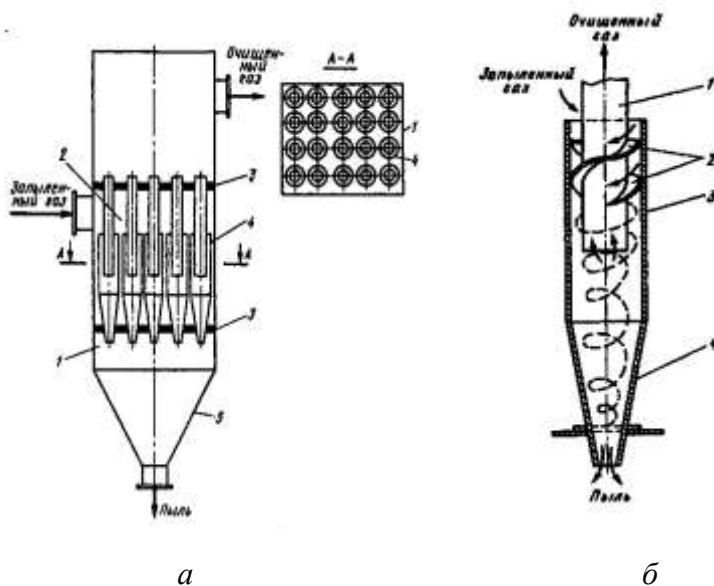


Рис. 9.10. Схема батарейного циклона

а) Батарейный циклон: 1- корпус; 2 – газораспределительная камера; 3 - решётка; 4 – циклонный элемент; 5 – бункер;

б) Элемент батарейного циклона: 1 – выходная труба; 2 – винтовые лопасти; 3 – корпус; 4 – коническое днище

Очистка газов под действием инерционных сил реализуется также в отстойных газоходах, которые характеризуются простотой конструкции и компактностью (рис.9.11). Такой пылеуловитель предназначен для разделения крупнодисперсных пылей и обеспечивает степень очистки около 60% при размере частиц более 25 мкм. Установленные в газоходе отбойные перегородки создают завихрение потока, и возникающие при этом инерционные силы способствуют интенсивному осаждению взвешенных в газе частиц.

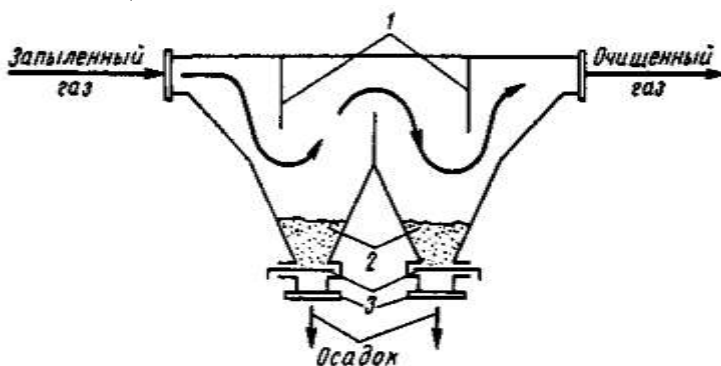
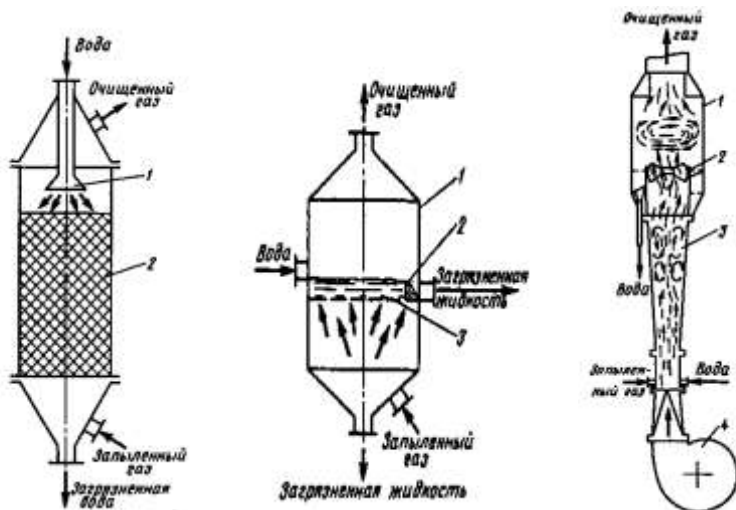


Рис. 9.11. Схема отстойного газохода:
1 – отбойные перегородки; 2 – сборники пыли; 3 – шиберы

В ряде случаев применяют мокрую очистку газов в аппаратах, называемых *скрубберами*. В основе мокрого пылеулавливания лежит контакт пылегазового потока с жидкостью, которая захватывает взвешенные частицы и выводит их из аппарата в виде шлама. Скрубберы при сравнительно простом устройстве обладают высокой эффективностью. Существуют различные конструкции скрубберов, из которых наиболее распространенными являются аппараты, приведенные на рисунке 9.12. Степень очистки газов от пыли для большинства конструкций скрубберов колеблется от 60 до 85 %.

Простейшими мокрыми пылеулавливателями являются полые или насадочные скрубберы, в которых запыленный газ подается в нижнюю часть аппарата, а жидкость разбрызгивается сверху.

В пенных барботажных скрубберах жидкость подается на перфорированную тарелку, а запыленный газ подается в нижнюю часть аппарата. При барботировании газа через слой жидкости на тарелке создается подвижный слой пены, в котором обеспечиваются хорошие условия для улавливания пыли. Этот тип скрубберов используется для очистки сильно запыленных газов. Степень очистки в таких аппаратах может достигать 99 %.



а

б

в

Рис. 9.12. Схемы скрубберов:

а – насадочный: 1 – разбрызгиватель; 2 – насадка;

б – пенный: 1 – корпус; 2 – регулирующий порог;

3 – перфорированная тарелка;

в – скруббер Вентури: 1 – разделитель; 2 – завихритель потока;

3 – труба Вентури; 4 – вентилятор

В скрубберах Вентури (рис. 9.12 в) также достигается высокая степень очистки. В этих аппаратах очищаемый воздух подается снизу через патрубок, на выходе из которого создается разрежение. Благодаря разрежению в трубу Вентури подсасывается вода, которая в виде пленки и мелких капель распределяется по всему объему трубы Вентури, смешиваясь с потоком газа. При этом происходит смачивание частиц пыли, их поглощение жидкостью и осаждение в разделителе.

Для осаждения мелкодисперсных частиц пылей, дымов а также туманов используются также электроосадители или электрофильтры. Процесс осаждения в этих аппаратах происходит в неоднородном электрическом поле постоянного напряжения и основан на ионизации молекул газа электрическим разрядом. В электроосадителях (рис. 9.13) положительно заряженные электроды (аноды) выполняются в виде трубы или пластины, а отрицательно заряженные – в виде проволоки, натянутой внутри трубчатого анода или между пластинчатыми анодами. При высокой разности потенциалов между электродами у катода – проволоки напряженность электрического поля достигает значения, при которой происходит полная ионизация газа, и возникает коронный разряд между электродами, сопровождающийся появлением светящейся «короны» вокруг проволоки. Поэтому проволоку называют коронирующим электродом. Образовавшиеся у коронирующего электрода положительные ионы движутся к нему и нейтрализуются, а свободные электроны направляются к осадительному электроду. Встречая на пути взвешенные в газе частицы они сообщают им свой заряд и увлекают к осадительному электроду, на котором частицы нейтрализуются и оседают. Скорость осаждения зависит от напряженности электрического поля. Электроосаждение используется и при копчении рыбо- и мясopодуKтов, когда на продукт осаждаются распыленные консерванты. При та-

ком способе улучшается качество продуктов, благодаря более равномерному распределению консервантов, а также экономятся консерванты.

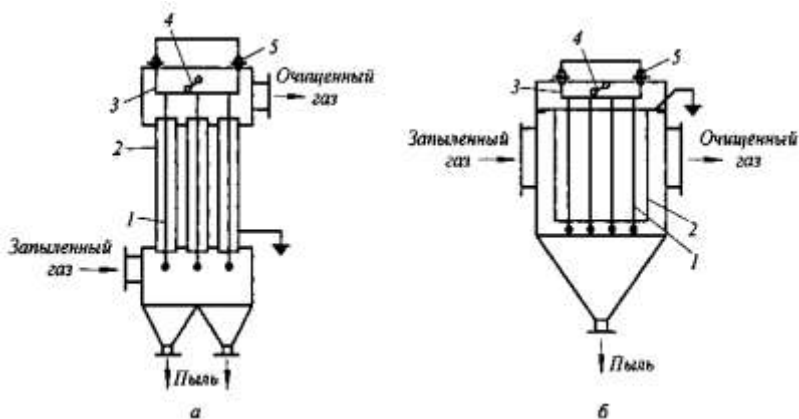


Рис. 9.13. Схема электроосадителей

а) трубчатый, б) пластинчатый

1 – коронирующие электроды;

2 – осадительные электроды; 3 – рама; 4 – устройства для встряхивания электродов; 5 - изоляторы

9.4. Расчет оборудования для процессов осаждения

Основным оборудованием для осаждения являются отстойники и отстойные (осадительные) центрифуги и циклоны. При расчете оборудования для осаждения исходят из того, чтобы продолжительность пребывания разделяемого потока в аппарате была равна или больше времени осаждения частиц. Кроме того необходимо, чтобы ско-

рость потока не достигала значений, при которых наблюдается взмучивание осадка и унос его частиц.

Производительность отстойника определяется его параметрами. Установить связь между параметрами отстойника и его производительностью можно на примере лоткового отстойника (рис. 8.14).

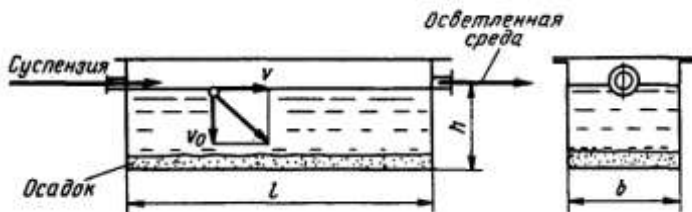


Рис.9.14. К расчету производительности отстойника

В соответствии с рисунком и с учетом связи рабочего объема с производительностью аппарата можно записать

$$V = b \cdot h \cdot l = V_{\tau} \cdot \tau_0, \quad (9.10)$$

где

V – рабочий объем отстойника, m^3 ;

b – ширина отстойника, m ;

h – высота отстойника, m ;

l – длина отстойника, m ;

V_{τ} – секундная производительность отстойника, m^3/c ;

τ_0 – расчетная продолжительность отстаивания частиц, c .

В свою очередь

$$\tau_0 = h / \omega_0, \quad (9.11)$$

где ω_0 – скорость отстаивания, m/c .

Таким образом, с учетом (9.10) и (9.11) секундная объемная производительность отстойника составляет

$$V_{\tau} = b \cdot l \cdot \omega_0 , \quad (9.12)$$

то есть производительность отстойника равна произведению площади отстаивания на скорость отстаивания.

Установленная связь позволяет определить требуемую площадь поверхности отстаивания для обеспечения заданной производительности отстойника

$$F_0 = V_{\tau} / \omega_0 = \frac{\Pi_{\tau}}{\rho_{\Pi} \cdot \omega_0} , \quad (8.13)$$

где Π_{τ} – массовая производительность отстойника, $м^3$;
 ρ_{Π} – плотность продукта, $кг/м^3$.

Как следует из приведенных выше соотношений, производительность отстойника может быть увеличена не только за счет увеличения площади поверхности отстаивания, но и посредством уменьшения пути, проходимой частицей при отстаивании, то есть за счет уменьшения высоты h . Этот принцип реализован в многоярусных отстойниках и тарельчатых сепараторах.

Расчет отстойной центрифуги обычно сводится к определению ее размеров для заданной производительности.

Рабочий объем центрифуги в $м^3$

$$V_P = \frac{V_{\text{ч}} \cdot \tau_0}{3600} , \quad (8.14)$$

где

$V_{\text{ч}}$ – часовая производительность отстойника, $м^3/ч$;

τ_0 – время осаждения, $с$.

Поскольку скорость осаждения в поле центробежных сил – величина переменная, зависящая от радиуса траектории частицы, то

$$\tau_0 = \int_{R_1}^{R_2} \frac{dR}{\omega_0} , \quad (9.15)$$

где

R_1 – внутренний радиус барабана центрифуги, м;

R_2 – внешний радиус вращения потока, м;

ω_0 – скорость отстаивания, м/с.

Высота рабочей части аппарата

$$H = \frac{V_v \cdot \tau_0}{3600 \cdot \pi(R_2^2 - R_1^2)} , \quad (9.16)$$

Мощность на привод центрифуги складывается из трех составляющих

$$N = N_1 + N_2 + N_3 , \quad (9.17)$$

где

N_1 – мощность на преодоление трения в подшипниках, кВт;

N_2 – мощность на преодоление трения барабана о воздух, кВт;

N_3 – мощность на обеспечение выхода осветленной жидкости из барабана, кВт.

Основными задачами при расчете циклонов являются определение геометрических размеров циклона и его гидравлического сопротивления.

Определяющим размером является диаметр цилиндрической части циклона $D_{ц}$. Остальные размеры обычно устанавливаются по нормативным соотношениям в соответствии с типажом циклона. Исходными величинами для расчета диаметра цилиндрической части является расход газа V_2 , м³/с и условная скорость газа в циклоне $\omega_{ц}$, м/с.

Под условной скоростью понимают частное от деления расхода газа на площадь поперечного сечения цилиндрической части циклона.

В этом случае диаметр цилиндрической части циклона рассчитывается по формуле

$$D_{ц} = \sqrt{V_2 / 0,785 \cdot \omega_{ц}} \quad (9.18)$$

Наилучшие условия для очистки газов в циклоне обеспечиваются при условной скорости газа $\omega_{ц} = 3 \dots 3,5$ м/с.

Общее гидравлическое сопротивление циклона

$$\Delta p = \xi_{ц} \frac{\rho \omega_{ц}^2}{2} \quad (9.19)$$

где

ρ – плотность газа, кг/м³ :

$\xi_{ц}$ – общий коэффициент гидравлического сопротивления циклона ($\xi_{ц} = 60 \dots 180$ в зависимости от типа циклона).

9.5. Краткие сведения о фильтрации

Процесс фильтрации основан на пропускании неоднородной среды через фильтрующую перегородку, которая способна пропускать только жидкость или газ и задерживать твердые частицы. *Движущей силой в процессе фильтрации является разность давлений на фильтрующей перегородке.* Движущая сила при фильтрации может создаваться за счет сил

- гравитационного поля;
- центробежного поля;
- поверхностного давления, создаваемого насосом, компрессором или вакуум насосом.

При фильтрации жидкие неоднородные системы разделяют на *фильтрат* и *осадок*. По целевому назначению фильтрацию делят на *очистное* и *продуктовое*.

При очистном фильтровании целевым продуктом является фильтрат. Этот вид фильтрования применяют для разделения суспензий и очистки растворов от различного рода нежелательных включений, а также очистки газов от взвешенных в них твердых частиц. В пищевой промышленности очистное фильтрование используют при осветлении вина и виноматериалов, молока, пива и других продуктов.

При продуктивном фильтровании целевым продуктом является осадок. Используется продуктивное фильтрование для выделения из суспензий диспергированных в них продуктов в виде осадка, например, для получения дрожжей из дрожжевых суспензий.

В зависимости от вида фильтрующей перегородки и свойств суспензии фильтрование может происходить

- с образованием осадка;
- с закупориванием пор;
- промежуточный вид, когда в процессе наблюдаются оба явления.

При фильтровании с образованием осадка может осуществляться три режима:

- стационарный режим;
- нестационарный режим;
- смешанный режим.

При стационарном режиме на протяжении всего процесса сохраняется постоянной скорость фильтрования. Для обеспечения этого условия необходимо с нарастанием слоя осадка и увеличения его гидравлического сопротивления соответствующим образом увеличивать перепад давления на фильтрующей перегородке.

При нестационарном режиме на протяжении всего процесса сохраняется постоянным перепад давления на фильтрующей перегородке, а скорость фильтрования уменьшается по мере нарастания слоя осадка.

Смешанный режим, который часто находит применение в практике промышленного фильтрования, характеризуется тем, что на первой стадии реализуется режим постоянной скорости (стационарный режим), а на второй стадии – режим постоянного давления (нестационарный режим).

9.6. Кинетика фильтрования

Скорость процесса фильтрования определяется скоростью протекания фильтрата через фильтрующую перегородку. Эта скорость может быть определена из выражения

$$\omega = \frac{dV}{d\tau \cdot F} = \frac{\Delta p}{\mu(R_\phi + R_o)}, \quad (9.20)$$

где

V – объем фильтрата, m^3 ;

τ – время фильтрования, c ;

$\frac{dV}{d\tau}$ – расход фильтрата, m^3/c ;

F – площадь поверхности фильтрования, m^2 ;

Δp – перепад давления, Pa ;

R_ϕ, R_o – сопротивление фильтрующей перегородки и осадка, m^{-1} ;

μ – динамическая вязкость среды, $Pa \cdot c$.

При расчете нестационарного фильтрования обычно путем интегрирования уравнения (9.20) определяют продолжительность фильтрования заданного объема фильтрата V или удельную производительность фильтра

$V_f = \frac{V}{F}$, m^3/m^2 . При этом входящее в уравнение сопротивление осадка выражают через высоту (толщину) слоя осадка и через удельное сопротивление осадка

$$R_o = r_o \cdot h_o = r_o \cdot x_o \frac{V}{F}, \quad (9.21)$$

где r_o – удельное сопротивление осадка, m^{-2} ;

h_o – высота слоя осадка, m ;

x_o – объем осадка, выделяющийся при прохождении $1m^3$ фильтрата;

V – объем фильтрата, m^3 ;

F – площадь поверхности фильтрования, m^2 ;

На практике обычно удельную производительность (нагрузку на фильтр) определяют опытным путем. Производительность фильтра периодического действия рассчитывают по формуле

$$V = \frac{3600 \cdot V_f \cdot F}{\tau_{ц}} , \text{ м}^3/\text{ч} , \quad (9.22)$$

где $\tau_{ц}$ – время цикла, с.

Время цикла состоит из продолжительности собственно фильтрации, времени разгрузки фильтра, промывки и подготовки его к работе.

При стационарном режиме фильтрования обычно определяют перепад давления на фильтрующей перегородке как функцию продолжительности фильтрования, при котором обеспечивается требуемая скорость фильтрования.

Для центробежного фильтрования используют фильтрующие центрифуги, которые устроены аналогично отстойным, но имеют перфорированный барабан, который с внутренней стороны покрыт тканью или другим фильтрующим материалом.

В процессе центробежного фильтрования в центрифугах периодического действия можно выделить три периода:

- 1-й период – период фильтрования с наибольшей скоростью удаления жидкости;
- 2-й период – уплотнение осадка;
- 3-й период – отжатие и высушивание осадка.

Движущей силой процесса является давление, создаваемое центробежной силой, величину которой можно рассчитать по формуле

$$\Delta p = \int_{R_0}^{R_H} \rho_c \omega_y^2 R \cdot dR = \frac{\rho_c \omega_y^2}{2} (R_H^2 - R_0^2) , \quad (9.23)$$

где

R_0 – внутренний радиус барабана центрифуги , м ;

R_H – наружный радиус барабана, м;

ρ_c – плотность суспензии, кг/м³;

ω_y – угловая скорость вращения барабана, рад/с.

9.7. Оборудование для фильтрования

Аппараты для фильтрования называются фильтрами, а фильтрование в центробежном поле осуществляется фильтрующими центрифугами.

Основным элементом фильтров является фильтровальная перегородка. Фильтровальная перегородка должна иметь возможно малое гидравлическое сопротивление, обеспечивать хорошую задерживающую способность для твердых частиц и получение чистого фильтрата.

Фильтровальные перегородки можно разделить на следующие группы:

- в зависимости от принципа действия различают поверхностные и глубинные фильтровальные перегородки;
- по материалу, из которого они изготовлены – хлопчатобумажные, шерстяные, синтетические, стеклянные, керамические и металлические;
- по структуре фильтровальные перегородки делятся на гибкие и негибкие.

Поверхностные перегородки отличаются тем, что твердые частицы суспензии задерживаются на их поверхности, не проникая в поры. При **глубинных перегородках** ча-

стицы суспензии в процессе фильтрования проникают в поры перегородок и задерживаются в них. Такие перегородки используются преимущественно для осветления суспензий с малой концентрацией твердых частиц.

Гибкие фильтровальные перегородки могут быть металлическими или неметаллическими. Металлические изготавливаются в виде перфорированных листов, сеток или ткани из стали, алюминия, никеля, серебра или различных сплавов. Неметаллические – в виде ткани или несвязанных волокон различных материалов (асбестовые, стеклянные, хлопчатобумажные, шерстяные, синтетические).

Негибкие перегородки бывают жесткими, в виде пористых дисков, плиток, патронов, получаемых методом спекания из твердых частиц различных материалов (металла, керамики, стекла, угля и т.п.), и нежесткими в виде слоя несвязанных твердых частиц угля, песка, или некоторых неорганических солей.

По организации процесса оборудование для фильтрования бывает непрерывного и периодического действия.

По назначению фильтры делят на жидкостные и газовые.

По способу создания перепада давления на фильтровальной перегородке фильтровальное оборудование делится на фильтры, работающие под вакуумом, под избыточным давлением, комбинированные и фильтрующие центрифуги.

По основным конструктивным признакам фильтры непрерывного действия делят на барабанные, дисковые и ленточные. Фильтры периодического действия – на листовые, камерные и рамные фильтр-прессы, нутч-фильтры. Среди фильтров, работающих под гидростатическим давлением столба жидкости, выделяют фильтры с зернистым слоем, фильтровальные чаны и листовые (мешочные).

Фильтрующие центрифуги по своему устройству от-

личаются от осадительных тем, что стенки барабана делаются перфорированными, и именно они являются фильтровальной перегородкой.

Ниже на рисунках представлены схемы некоторых видов фильтровального оборудования.

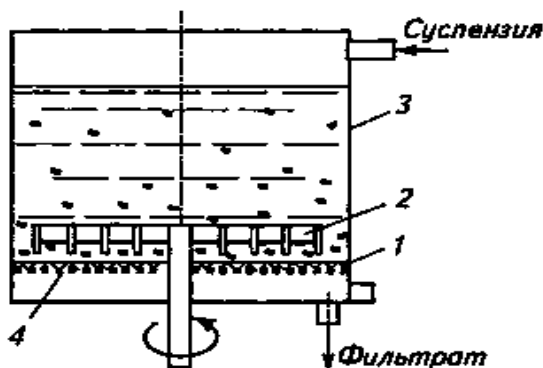


Рис. 9.15. Схема фильтрационного чана:
1 – фильтрующая ткань; 2 – мешалка; 3 – корпус;
4 - решетка

В фильтрационном чане (рис. 9.15) осадок накапливается на фильтровальной перегородке, выполненной в виде сетки с тканью. Верхние слои осадка периодически перемешиваются мешалкой. При необходимости осадок удаляют через насадок большого поперечного сечения.

Для работы при избыточном давлении 0,3...0,4 МПа применяют фильтр-прессы. Устройство и принцип действия рамного фильтр-пресса иллюстрируют рисунки 9.16 и 9.17. Такие фильтры используются для осветления вино-материалов, вина, молока и пива.

Фильтрующий блок рамного фильтр-пресса состоит из чередующихся рам и плит с зажатой между ними фильтровальной тканью или картоном. Рамы и плиты за-

жимаются в направляющих зажимным винтом 7. Каждая рама и плита (рис. 9.17) имеют каналы для ввода суспензии и промывной жидкости. Фильтрат, прошедший через фильтровальную перегородку, попадает по дренажным каналам плит в сборный канал и сливается через отводной канал 5.

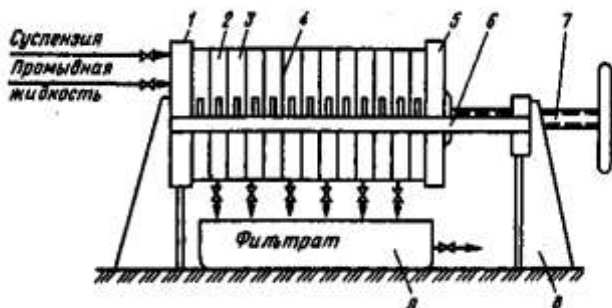


Рис. 9.16. Рамный фильтр-пресс:

1 – упорная плита; 2 – плита; 3 – рама; 4 – фильтровальная перегородка; 5 – подвижная плита; 6 – горизонтальная направляющая; 7 – винт; 8 – станина; 9 – желоб

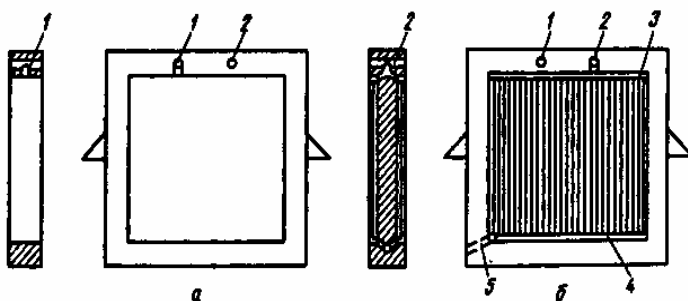


Рис. 9.17. Рама (а) и плита (б) фильтр-пресса:

1, 2 – каналы для ввода суспензии и промывной жидкости; 3 – дренажный канал; 4 – сборный канал; 5 – отводной канал

Автоматический камерный фильтр-пресс (рис. 9.18) состоит из расположенных одна над другой опорных фильтрующих плит 2, под которыми располагаются камеры для сбора фильтрата. Для образования камер в пазах рам установлены резиновые шланги, которые создают уплотнение камер при подаче в шланги жидкости под давлением $0,8 \dots 1,0 \text{ МПа}$. Над плитами через направляющие ролики протянута бесконечная лента фильтровальной ткани 3. Над плитами через направляющие ролики протянута бесконечная лента фильтровальной ткани 3.

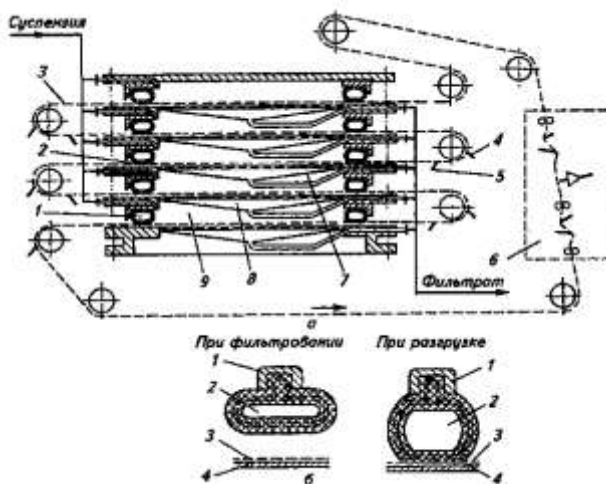


Рис. 9.18. Автоматический камерный фильтр-пресс:
 а – схема фильтра: 1 – шланг уплотняющий резиновый;
 2 – опорная щелевидная плита; 3 – фильтровальная ткань;
 4 – нож для съема осадка; 5 – нож подчистки; 6 – камера
 регенерации; 7 – поддон; 8 – камера для чистого фильтрата;
 9 – камера для суспензии:
 б – уплотняющие шланги: 1 опорная плита; 2 – шланг;
 3 – фильтровальная ткань; 4 – опорная щелевидная плита

Суспензия подается в камеры 9 над фильтрующими перегородками, а фильтрат отводится из камер 8 с поддонами. Цикл работы фильтра состоит из следующих опера-

ций: подачи жидкости в шланги и образования камер; фильтрования; промывки осадка; отдувки промытого сжатым воздухом; подсушивания осадка сжатым воздухом; удаления осадка и регенерации фильтровальной ткани.

Представленный на рисунке 9.19 нутч-фильтр может работать как под вакуумом, так и под избыточном давлением. Такие фильтры имеют довольно широкое распространение в малотоннажных производствах. Он имеет механизированную выгрузку осадка, для чего используется однолопастная мешалка. Суспензия и сжатый воздух подаются через отдельные штуцера, а фильтрат отводится через спускной кран.

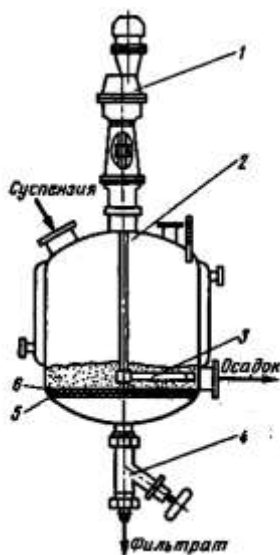


Рис. 9.19. Нутч-фильтр с перемешивающим устройством:

- 1 – привод;
- 2 – корпус фильтра;
- 3 – мешалка;
- 4 – спускной кран;
- 5 – фильтровальная перегородка;
- 6 – фильтровальная ткань

На рисунке 9.20 представлен ленточный фильтр, основу которого составляет ленточный конвейер с перфорированной резиновой лентой.

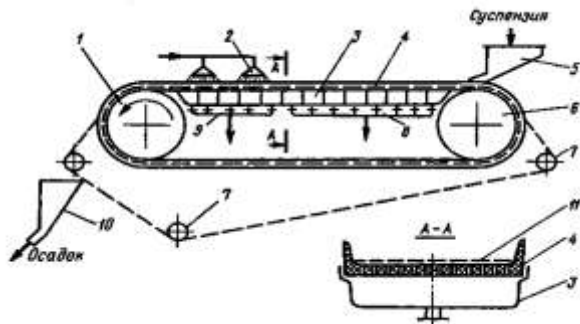


Рис. 9.20. Ленточный вакуум-фильтр:

- 1 – приводной барабан; 2 – форсунка; 3 – вакуум-камера;
 4 – резиновая лента; 5 – лоток; 6 – натяжной барабан;
 7 – натяжные ролики; 8 – коллектор для фильтрата;
 9 – коллектор для промывной жидкости; 10 – сборник осадка; 11 – фильтровальная ткань

К перфорированной резиновой ленте прижимается фильтровальная ткань, также выполненная в виде бесконечной ленты. Под перфорированной лентой располагаются вакуум-камеры, что позволяет создать перепад давления на фильтрующей перегородке.

Суспензия подается на фильтровальную ткань из лотка 5. Фильтрат отсасывается под вакуумом в камеры и отводится через коллектор 8 в сборник продукта. Промывная жидкость подается через форсунки 2 на образовавшийся осадок и отводится через коллектор 9. фильтровальная ткань отделяется от резиновой ленты на приводном барабане и огибает направляющий ролик. При этом осадок соскальзывает с ткани и попадает в сборник осадка. Фильтровальная ткань, проходя между натяжными роликами 7, промывается, просушивается и очищается.

Одним из наиболее распространенных вакуумных фильтров непрерывного действия является барабанный вакуум-фильтр (рис. 9.21).

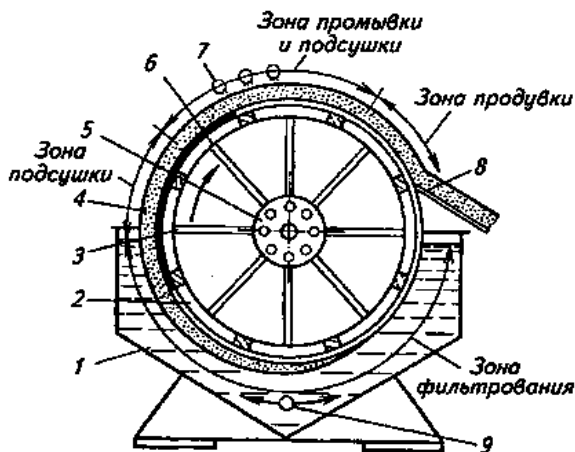


Рис. 9.21. Схема барабанного вакуум-фильтра:

- 1 – корпус; 2 – барабан; 3 – перегородка; 4 – осадок;
 5 – трубка; 6 – головка фильтра; 7 – форсунки; 8 – нож;
 9 – мешалка

В этом фильтре перфорированный барабан 2, покрытый с наружной стороны фильтровальной тканью, разделен перегородками 3 на изолированные друг от друга секции. При вращении барабана секция последовательно проходит зоны фильтрования, первичного обезвоживания, (подсушки), промывки и второй подсушки, зоны продувки и удаления осадка. Промывка осадка осуществляется с помощью форсунок 7, а для удаления осадка с поверхности барабана установлен нож 8. Мешалка 9 служит для взбалтывания осадка в фильтруемой суспензии.

Для очистки газов от пыли применяют фильтры как с мягкими фильтровальными перегородками (рукавные или мешочные), так и с жесткими фильтровальными перегородками, изготовленными из пористой керамики, спеченных или спрессованных металлических порошков, а также пластмасс.

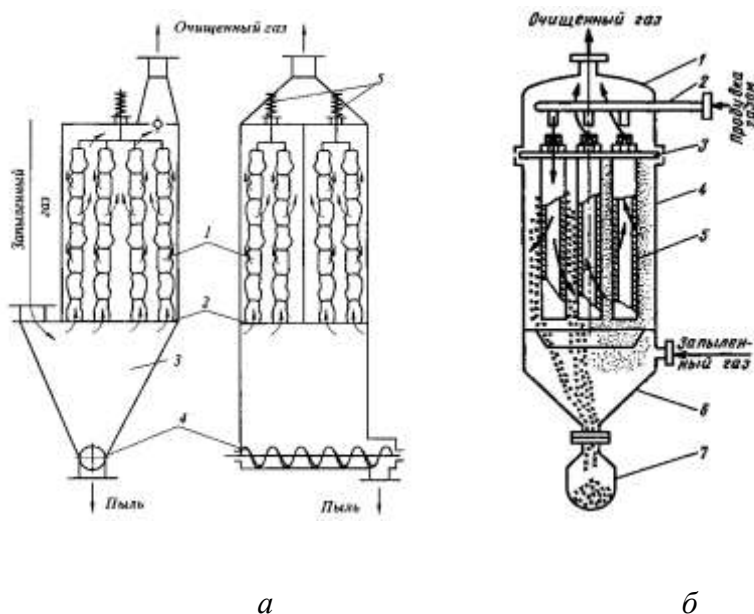


Рис. 9.22. Схема рукавного (а) и патронного (б) фильтров

В рукавном фильтре (рис. 9.22 а) рукава или мешки из фильтровальных материалов подвешивают в прямоугольном корпусе к общей раме. Запыленный газ подается снизу внутрь рукавов и, проходя через боковые поверхности рукавов, фильтруется. Пыль оседает на внутренней поверхности рукавов. Для регенерации фильтра рукава или мешки периодически встряхивают специальным механиз-

мом. Осевшая пыль собирается в коническом днище фильтра, откуда выгружается шнеком.

Фильтры с жесткими фильтровальными перегородками используют для тонкой очистки газов. В патронном фильтре (рис. 9.22 б) в корпусе 4 расположено несколько цилиндрических фильтрующих элементов 5 из керамики. Запыленный газ поступает в нижнюю часть фильтра и проходит внутри патронов, очищаясь от пыли. Для регенерации фильтра его периодически продувают обратным током сжатого газа подаваемого в патрубок 2 с форсунками. При этом пыль собирается в коническом днище 6 и удаляется в сборник 7.

9.8. Краткие сведения о расчете фильтров

Основными задачами при расчете фильтрующей аппаратуры является определение производительности фильтра или определение фильтрующей поверхности для заданной производительности.

В практических расчетах используют значения удельной производительности (нагрузки на фильтр) V_f , $\text{м}^3/\text{м}^2$, которую для разного типа фильтров находят опытным путем. При этом производительность фильтра определяется по формуле

$$V_{\text{ц}} = \frac{3600 \cdot V_f \cdot F}{\tau_{\text{ц}}}, \quad (9.24)$$

где

V_f – нагрузка на фильтр, $\text{м}^3/\text{м}^2$;

F – площадь поверхности фильтрования, м^2 ;

$\tau_{\text{ц}}$ – время цикла, с.

В свою очередь время цикла складывается из трех составляющих

$$\tau_{\text{ц}} = \tau_{\text{ф}} + \tau_{\text{пр}} + \tau_{\text{р}},$$

где

$\tau_{\text{ф}}$ – продолжительность фильтрации, с ;

$\tau_{\text{пр}}$ – время, затрачиваемое на промывку фильтра, м² ;

$\tau_{\text{р}}$ – длительность разгрузки фильтра и подготовки к работе, с .

При определении требуемой площади поверхности фильтрования для заданной часовой производительности фильтров непрерывного действия сначала определяют скорость фильтрации ω , а затем находят площадь фильтрующей поверхности по формуле

$$F = \frac{V_{\text{ч}}}{3600 \cdot \omega} \quad (9.25)$$

9.9. Мембранное разделение

Мембранные технологии находят все более широкое применение при концентрировании, очистке и фракционировании растворов и жидких пищевых продуктов (пива, вина, молочных продуктов и др.). Их используют также при очистке воздуха и создании регулируемых газовых сред для хранения сельскохозяйственной продукции.

Мембраны – полупроницаемые перегородки с диаметром пор менее 10 мкм. При этом к мембранным технологиям относят **ультрафильтрацию** и **обратный осмос**.

Ультрафильтрация представляет собой процесс разделения, концентрирования или фракционирования растворов с использованием мембран с диаметром пор 3...100 нм и перепаде давления 0,1 ...2, 0 МПа. При ультрафильтрации мембрана пропускает низкомолекулярные соединения и задерживает высокомолекулярные. При этом не образуется осадка, а система разделяется на два раство-

ра: – один из которых обогащен низкомолекулярным компонентом, а другой – высокомолекулярным.

Обратный осмос – процесс разделения растворов с использованием мембран с диаметром пор менее 3 нм и при перепаде давлений 1...25 МПа. Обратный осмос основан на способности мембран пропускать молекулы растворителя и задерживать молекулы растворенного вещества.

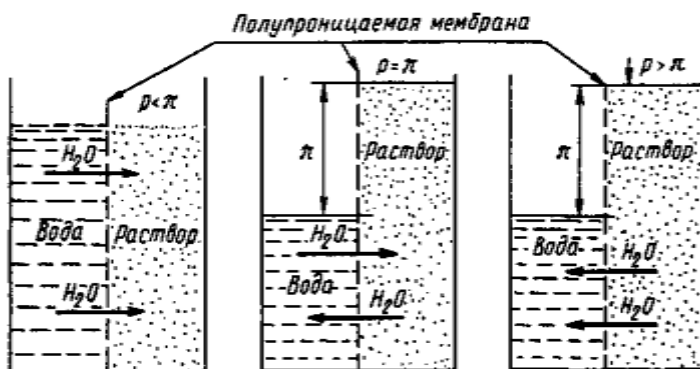


Рис. 9.23. Схема механизма обратного осмоса

Движущей силой для процесса обратного осмоса является разность давления над раствором p и осмотического давления π . При этом, если $p < \pi$, то имеет место осмос, то есть процесс дифundирования растворителя в раствор, а если $p > \pi$, то будет происходить обратный осмос, то есть процесс обогащения раствора (рис. 8.23).

Тестовые контрольные вопросы и задания

1. С какой целью осуществляется разделение неоднородных систем? 2. Каким показателем оценивается эффек-

тивность процессов разделения неоднородных систем?

3. Назовите два основных вида разделения неоднородных систем.
4. Что собой представляет осаждение?
5. Что является движущей силой в процессах осаждения?
6. Назовите виды осаждения по источнику движущей силы.
7. Какой процесс называют отстаиванием?
8. Что такое декантат?
9. Назовите основные типы оборудования для осаждения?
10. От каких основных факторов зависит производительность отстойников?
11. Назовите два вида оборудования для осаждения в центробежном поле и укажите принципиальное их различие?
12. Что такое фактор разделения для центрифуг и как он определяется.
13. По какому принципу центрифуги делят на нормальные и сверхцентрифуги (ультрацентрифуги).
14. В каких случаях применяется осаждение в электрическом поле?
15. От каких основных факторов зависит эффективность электрофильтров?
16. Что является движущей силой в процессах фильтрации?
17. Назовите способы создания движущей силы при фильтрации?
18. Назовите три вида фильтрации, обусловленные свойствами фильтрующей перегородки и свойствами разделяемой суспензии?
19. Назовите три режима фильтрации с образованием осадка?
20. В чем состоит особенность стационарного режима фильтрации?
21. В чем состоит особенность нестационарного режима фильтрации?
22. Как определяется скорость фильтрации?
23. От каких основных факторов зависит скорость фильтрации?
24. Что является движущей силой при обратном осмосе?
25. В чем заключается суть мембранного разделения?

10. Псевдооживление

Псевдооживлением называют процесс приведения слоя зернистого материала в состояние, когда он приобретает многие свойства капельной жидкости, прежде всего, текучесть и интенсивное перемешивание частиц материала. Слой в таком состоянии называют псевдооживленным или кипящим. Чаще всего псевдооживление достигается пропусканием через слой зернистого материала оживающего агента (обычно воздуха).

Состояние слоя зернистого материала при продувке его газом наглядно изображается кривой псевдооживления, представляющей зависимость перепада давления в слое материала (аэродинамического сопротивления слоя) Δp от скорости оживающего агента ω .

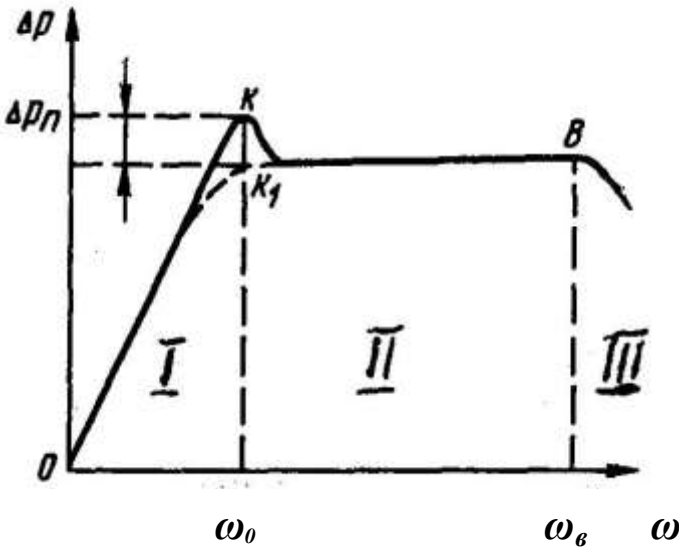


Рис.10.1. Кривая псевдооживления

На кривой псевдооживления можно выделить три зоны:

I – зона фильтрования, для которой наблюдается практически линейный рост аэродинамического сопротивления слоя с увеличением скорости оживляющего агента;

II – зона псевдооживления, на протяжении которой сопротивление слоя остаётся неизменным или меняется незначительно;

III – зона пневмотранспорта (уноса), для которой наблюдается резкое падение сопротивления слоя.

Границами этих зон являются значения первой критической и второй критической скорости. Первая критическая скорость ω_0 соответствует началу псевдооживления, а вторая $\omega_с$ – началу уноса, то есть переходу к режиму пневмотранспорта. При этом скорость оживляющего агента определяется отношением его объёмного расхода к площади поперечного сечения слоя материала по направлению потока.

При переходе к режиму псевдооживления наблюдается скачок давления, который обусловлен наличием сцепления между частицами материала и частиц со стенками аппарата.

В режиме псевдооживления вес слоя материала уравновешивается силой трения между потоком газа и частицами материала. То есть условие существования псевдооживленного слоя можно записать в виде

$$\Delta p = \frac{G}{F} , \quad (10.1)$$

где

Δp – перепад давления в слое (сопротивление слоя), Па;

G – вес слоя материала, Н;

F – площадь сечения слоя, м².

При увеличении скорости оживающего агента в режиме псевдооживления увеличивается разрыхление слоя материала, и, вследствие этого, перепад давления в слое остается практически неизменным. Состояние слоя в режиме псевдооживления может быть охарактеризовано порозностью материала, а также числом псевдооживления

$$W = \frac{\omega_p}{\omega_0},$$

где ω_p – рабочая скорость;

ω_0 – первая критическая скорость.

Для расчёта критической скорости предложено достаточно большое количество критериальных зависимостей. На практике наибольшее распространение получили формулы О.Тодеса для определения числа Рейнольдса, соответствующего первой и второй критической скорости.

Для первой критической скорости

$$\text{Re}_0 = \frac{\omega_0 d_s}{\nu} = \frac{Ar}{1400 + 5,22\sqrt{Ar}}. \quad (10.2)$$

Для второй критической скорости

$$\text{Re}_e = \frac{\omega_e d_s}{\nu} = \frac{Ar}{18 + 5,22\sqrt{Ar}}. \quad (10.3)$$

В этих формулах приняты обозначения:

d_s – приведённый размер частиц;

ν – кинематическая вязкость оживающего агента, м/с;

Ar – критерий Архимеда.

Приведённый размер частиц находится по формуле

$$d_{\text{э}} = 0,75d_{\text{ср}} ,$$

где $d_{\text{ср}}$ – средний эквивалентный диаметр частиц, м.

Критерий Архимеда рассчитывается по формуле

$$Ar = \frac{gd_{\text{э}}^3}{\nu^2} \left(\frac{\rho_{\text{ч}} - \rho}{\rho} \right) , \quad (10.4)$$

где

g – ускорение силы тяжести, м /с² ;

$\rho_{\text{ч}}$ – плотность материала частиц, кг /м³ ;

ρ – плотность ожижающего агента, кг /м³.

Значения первой и второй критической скорости рассчитываются по формулам:

$$\omega_0 = \frac{Re_0 \nu}{d_{\text{э}}} , \quad (10.5)$$

$$\omega_0 = \frac{Re_0 \nu}{d_{\text{э}}} . \quad (10.6)$$

Псевдооживление способствует интенсификации процессов тепло- и массообмена и широко используется при сушке сыпучих продуктов, для смешивания и транспортировки сыпучих материалов (аэрогравитационные транспортеры), а также в аппаратах для адсорбции. Текучесть

псевдооживленного слоя позволяет создавать аппараты непрерывного действия с непрерывным поступлением и отводом твёрдой фазы.

Тестовые контрольные вопросы и задания

1. Что такое псевдооживление? 2. Что такое ожигающий агент? 3. Как выражается основное условие существования псевдооживленного слоя? 4. Что такое первая критическая скорость? 5. Что такое вторая критическая скорость? 6. Что собой представляет кривая псевдооживления? 7. Изобразите примерный вид кривой псевдооживления и укажите на ней характерные точки и зоны? 8. С какой целью применяется псевдооживление? 9. В каких технологиях применяется процесс псевдооживления? 10. Как рассчитывается скорость ожигающего агента? 11. Как влияет плотность частиц материала на значение критической скорости? 12. Как влияет плотность ожигающего агента на значение критической скорости? 13. Как влияет размер частиц материала на значение критической скорости? 14. Что представляет собой число псевдооживления? 15. Приведите выражение критерия Архимеда.

Рекомендуемая литература

1. Кавецкий Г.Д., Васильев Б.В. Процессы и аппараты пищевой технологии.-М.:Колос,1999.
2. Стабников В. Н. и др. Процессы и аппараты пищевых производств. - М.: Агропромиздат ,1985.
3. Процессы и аппараты пищевых производств: Учебник для вузов: в 2 кн. / [А.Н. Остриков и др.]; под ред. А.Н. Острикова.– ГИОРД, 2007.
4. Плаксин Ю.М. и др. Процессы и аппараты пищевых производств. - М.: Колос, 2008.

Содержание

Предисловие	3
Введение	4
1. Общие сведения о процессах и аппаратах	8
1.1. Основные понятия и определения.....	8
1.2. Классификация основных процессов переработки сельскохозяйственной продукции и аппаратов.....	9
1.3. Основные параметры, характеризующие процессы и аппараты.....	12
1.4. Кинетика процессов переработки.....	14
1.5. Требования, предъявляемые к машинам и аппаратам пищевых производств.....	16
1.6. Основные параметры, характеризующие протекание производственных процессов.....	16
2. Краткие сведения о средах в процессах переработки	20
2.1. Свойства материалов и продуктов.....	20
2.2. Классификация еднородных систем.....	26
Механические процессы в переработке	
3. Измельчение	29
3.1. Общие сведения о процессе измельчения.....	29
3.2. Краткие сведения о дроблении.....	29
3.3. Общие сведения о дробилках.....	34
3.4. Краткие сведения о резании.....	41
3.5. Общие сведения о машинах для резания.....	42

3.6. Элементы расчета дробилок.....	48
4. Процессы классификации и ситовой анализ.....	
4.1. Краткие сведения о процессах классификации.....	53
4.2. Оборудование для классификации.....	53
4.3. Ситовой анализ.....	61
4.4. Основы расчета грохотов.....	62
5. Процессы прессования и прессующие машины.....	
5.1. Общие сведения о процессах прессования.....	65
5.2. Оборудование для обработки материалов давлением...	71
6. Перемешивание сыпучих материалов.....	80
7. Основы гидравлики.....	
7.1. Общие сведения о гидравлике.....	88
7.2. Элементы гидростатики.....	90
7.3. Элементы гидродинамики.....	92
7.4. Краткие сведения о насосах.....	101
7.5. Распыление жидкости.....	103
7.6. Барботаж.....	105
7.7. Течение двухфазных систем в каналах.....	107
7.8. Краткие сведения о неньютоновских жидкостях.....	109
Гидромеханические процессы	
8. Перемешивание.....	
8.1. Краткие сведения о гидромеханических процессах.....	113
8.2. Общие сведения о процессах перемешивания.....	113
8.3. Оборудование для перемешивания жидкостей.....	115

8.4. Оборудование для перемешивания пластических масс.....	120
8.5. Элементы расчета мешалок.....	122
9. Процессы разделения неоднородных систем.....	
9.1. Общие сведения о процессах разделения неоднородных систем.....	124
9.2. Краткие сведения о кинетике осаждения.....	125
9.3. Оборудование для процессов осаждения.....	132
9.4. Расчет оборудования для процессов осаждения.....	143
9.5. Краткие сведения о фильтровании.....	148
9.6. Кинетика фильтрования.....	149
9.7. Оборудование для фильтрования.....	152
9.8. Краткие сведения о расчете фильтров.....	161
9.9. Мембранное разделение.....	162
10. Псевдооживление.....	165
Рекомендуемая литература.....	179

Учебное издание

Чащинов Валерий Иванович

ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ

**Курс лекций
Часть I**

Редактор Лебедева Е.М.

Подписано к печати 13.07.2012 г. Формат 60x84 ¹/₁₆.
Бумага офсетная. Усл. п. л. 10,11. Тираж 100 экз. Изд. № 2198.

Издательство Брянской государственной сельскохозяйственной академии
243365 Брянская обл., Выгоничский район, с. Кокино, Брянская ГСХА