

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ОРЕНБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ
ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ**

Б1.В.20 Процессы и аппараты пищевых производств

**Направление подготовки 35.03.07 Технология производства и переработки
сельскохозяйственной продукции**

**Профиль подготовки Хранение и переработка сельскохозяйственной
продукции**

Форма обучения очная

СОДЕРЖАНИЕ

1. Конспект лекций	3
1.1 Лекция № 1 История развития науки о процессах и аппаратах. Основные свойства продуктов.....	3
1.2 Лекция № 2 Механические процессы. Измельчение материалов.....	6
1.3 Лекция № 3 Классификация материалов.....	10
1.4 Лекция № 4 Прессование материалов.....	12
1.5 Лекция № 5 Моделирование процессов и аппаратов.....	16
1.6 Лекция № 6 Способы разделения неоднородных систем. Перемешивание.....	19
1.7 Лекция № 7 Разделение газовых неоднородных систем.....	24
1.8 Лекция № 8 Теплообменные процессы.....	27
1.9 Лекция № 9 Теоретические основы теплопередачи.....	32
1.10 Лекция № 10 Массообменные процессы.....	37
2. Методические материалы по выполнению лабораторных работ	40
2.1 Лабораторная работа № ЛР-1 Изучение процесса измельчения сыпучих материалов в молотковой дробилке.....	40
2.2 Лабораторная работа № ЛР-2 Определение основных характеристик процесса классификации материалов в бурате.....	46
2.3 Лабораторная работа № ЛР-3 Решение задач по измельчению материалов.....	51
2.4 Лабораторная работа № ЛР-4 Решение задач по классификации и прессованию материалов.....	54
2.5 Лабораторная работа № ЛР-5 Определение констант отстаивания и коэффициента сопротивления среды.....	57
2.6 Лабораторная работа № ЛР -6 Испытание лопастной мешалки.....	66
2.7 Лабораторная работа № ЛР-7 Решение задач по гидромеханическим процессам	72
2.8 Лабораторная работа № ЛР-8 Испытание ректификационной установки.....	74
2.9 Лабораторная работа № ЛР-9 Изучение тепловых процессов в пластинчатом теплообменнике.....	85
2.10 Лабораторная работа № ЛР-10 Изучение процесса экстракции	90

1. КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

1.1 Лекция №1 (2 часа).

Тема: «История развития науки о процессах и аппаратах. Основные свойства продуктов»

1.1.1 Вопросы лекции:

1. Особенности дисциплины, ее связь с другими дисциплинами
2. История создания и развития курса. Классификация процессов
3. Основные свойства пищевых продуктов и сырья

1.1.2 Краткое содержание вопросов:

1. Особенности дисциплины, ее связь с другими дисциплинами

Особенностью курса является изучение внутренних закономерностей процессов, а также разработка научно обоснованных методов расчета процессов, аппаратов и машин.

Дисциплина «Процессы и аппараты пищевых производств» является синтетическим курсом, базирующимся на ранее изученных дисциплинах (высшей математике, физике, химии, теоретической механике, теплотехнике, гидравлике, электротехнике), и помимо самостоятельного значения служит теоретической основой для изучения последующих дисциплин по технологическому оборудованию, пищевой технологии, расчету и конструированию машин и аппаратов пищевых производств.

Несмотря на большое разнообразие пищевых продуктов, получение их связано с проведением одностипных процессов, например, нагревания, перемешивания, фильтрования, сушки, сепарирования и др., являющихся *общими* для многих пищевых производств. Наряду с этим в каждом производстве имеются *специфические* процессы, характерные только для данного производства.

Таким образом, процессы пищевых производств могут быть разделены на *общие и специфические*. Курс процессов и аппаратов имеет целью рассматривать технологические процессы независимо от вида производства, в котором эти процессы используются. Так, например, перемешивание раскрывается с общей точки зрения, а не с точки зрения применения этого процесса конкретно в каком-то производстве.

Такой подход к изучению процессов способствует повышению научно-технического уровня инженерной подготовки.

2. История создания и развития курса. Классификация процессов

Учение о процессах и аппаратах зародилось в конце XIX века одновременно и независимо в России и США. Основные начала этой дисциплины были заложены Д.И. Менделеевым, который в 1897 году в книге «Основы фабрично-заводской промышленности» впервые четко сформулировал классификацию основных процессов химической технологии и обратил серьезное внимание на развитие непрерывных процессов. Затем в 1901 году А.К. Крупский в учебном пособии, посвященном вопросам расчета аппаратов, изложил метод обобщения в науке о процессах и аппаратах, заключающийся в следующем:

- 1) из большого количества технологических процессов путем группирования выделяется ограниченное число основных процессов;
- 2) при изучении основных процессов и их отдельных групп используются единые закономерности.

В дальнейшем эти идеи получили развитие в работах И.А. Тищенко, который, начиная с 1911 года, читал курс процессов и аппаратов в Московском высшем техническом училище. Наибольшие успехи в развитии теории о процессах и аппаратах и прикладном значении ее достигнуты благодаря работам Д.П. Коновалова, А.А. Кирова, А.Г. Касаткина, П.Г. Романкова, А.В. Лыкова и многих других.

Особо следует отметить работы М.В. Кирпичева, М.А. Михеева и А.А. Гухмана по теории подобия и моделирования, на основе которой в настоящее время строится учение о процессах и аппаратах.

Классификация процессов пищевых производств

В зависимости от основных закономерностей, характеризующих протекание процессов, последние делятся на следующие группы: *гидромеханические, механические, тепловые, массообменные процессы*.

К гидромеханическим процессам, основой которых является гидромеханическое или гидростатическое воздействие на материалы, относят перемешивание и смешивание жидких сред, отстаивание, фильтрование, центрифугирование, очистку воздуха и газов. Движущей силой этих процессов является гидростатическое, гидродинамическое давление или центробежная сила.

К механическим процессам, основой которых является механическое воздействие на твердые материалы, относят измельчение, сортирование, прессование и смешивание сыпучих материалов. Движущими силами этих процессов являются силы механического воздействия на материалы.

К тепловым (теплообменным) процессам, основой которых является изменение теплового состояния взаимодействующих сред, относят нагревание, охлаждение, выпаривание, конденсацию и получение искусственного холода. Движущей силой этих процессов является разность между температурами взаимодействующих сред.

К массообменным (диффузионным) процессам, в которых наряду с теплопередачей большую роль играет переход вещества из одной фазы в другую за счет диффузии, относятся абсорбция, адсорбция, сушка, перегонка и ректификация, экстрагирование и кристаллизация. Движущей силой этих процессов является разность концентраций вещества во взаимодействующих фазах.

Химические и биохимические процессы — это процессы, связанные с изменением химического состава и свойств вещества, скорость протекания которых определяется законами химической кинетики.

3. Основные свойства пищевых продуктов и сырья

Плотность ρ — это отношение массы M тела (вещества) к его объему V . Описывается формулой

$$\rho = M/V$$

и выражается в килограммах на 1 м^3 , тоннах на 1 м^3 или граммах на 1 см^3 .

Плотность представляет собой величину, обратную удельному объему $v_{\text{уд}}$, т. е. объему, занимаемому единицей массы вещества;

Удельный вес γ — это отношение веса тела (вещества) к его объему. В отличие от плотности удельный вес не является физико-химической характеристикой вещества, так как зависит от места измерения. Между удельным весом и плотностью существует соотношение

$$\gamma = \rho g,$$

где g — ускорение свободного падения, м/с^2 ($9,81 \text{ м/с}^2$).

Вязкость — это свойство газов и жидкостей сопротивляться действию внешних сил, вызывающих их течение.

Согласно гипотезе И. Ньютона при параллельно-струйном (ламинарном) течении среды вязкость проявляется в том, что при сдвиге соседних слоев среды один относительно другого возникает сила противодействия. Эта сила противодействия характеризуется напряжением сдвига, или, как его еще называют, *напряжением внутреннего трения*, или касательным напряжением, которое пропорционально скорости относительного сдвига слоев жидкости. Напряжение сдвига представляет собой отношение силы сопротивления, возникающей между движущимися слоями среды, к площади поверхности соприкосновения слоев среды.

Напряжение сдвига

$$\tau = -\mu(dv/dl),$$

где dv/dl — градиент скорости (dv — изменение скорости течения при удалении на расстояние dl от поверхности слоя в перпендикулярном к нему направлении).

Динамическая вязкость μ (в Па·с) может быть выражена формулой

$$\mu = (P/F)(dl/dV),$$

где P — сила, приложенная извне, Н; F — площадь действия силы, м² (P/F — давление сдвига, Па); l — расстояние между слоями, м; v — скорость сдвига, м/с.

Кинематическая вязкость (или коэффициент кинематической вязкости) определяется по формуле

$$\nu = \mu / \rho$$

и выражается в квадратных метрах в секунду. Кинематическая вязкость среды плотностью 1 кг/м³, динамическая вязкость которой равна 1 Па·с, составляет 1 м²/с.

Теплоемкость — это отношение количества теплоты, подводимой к веществу, к соответствующему изменению его температуры. Теплоемкость единицы количества вещества называется **удельной теплоемкостью**. В расчетах используют массовую, объемную и мольную удельные теплоемкости.

Удельная теплоемкость зависит от того, при каком процессе (**изобарном, изохорном, адиабатном, политропическом, изотермическом**) происходит обмен энергией между веществом и окружающей средой.

Наиболее часто в расчетной практике используются **изобарная** теплоемкость c_p и **изохорная** теплоемкость c_v , которые связаны между собой уравнением

$$c_p - c_v = R$$

1.2 Лекция №2 (2 часа).

Тема: «Механические процессы. Измельчение материалов»

1.2.1 Вопросы лекции:

1. Особенности измельчения материалов.
2. Физические основы измельчения.
3. Конструкция измельчающих машин.

1.2.2 Краткое содержание вопросов:

1. Особенности измельчения материалов.

Измельчение — это процесс увеличения поверхности твердых материалов путем их раздавливания, раскалывания, истирания и удара.

Метод измельчения выбирают в зависимости от крупности и физико-механических свойств измельчаемых материалов. На практике часто применяют **комбинированные** методы измельчения.

Процессы измельчения разделяются на **дробление** (крупное, среднее и мелкое), **измельчение** (тонкое и очень тонкое) и **резание**. Резание применяют, когда требуется не только уменьшить размер кусков, но и придать им определенную форму.

Изрезанию подвергаются овощи и фрукты, конфетная и тестовая масса, мясо и другие продукты.

На измельчающих машинах можно проводить различные процессы измельчения, начиная от измельчения глыб и кончая коллоидным измельчением, позволяющим получать продукт с частицами размером до 0,1 мкм.

Классификация — это процесс разделения однородного сыпучего материала по величине его частиц.

Процесс измельчения характеризуется степенью измельчения,

т. е. отношением среднего размера куса материала до измельчения d_n к среднему размеру куса после измельчения d_k :

$$i = d_n / d_k$$

На практике размеры кусков (d_n и d_k) характеризуются размером отверстий сит, через которые просеивают сыпучий материал до и после измельчения.

С целью получения высоких степеней измельчения процесс измельчения проводят в несколько стадий на последовательно установленных машинах.

В зависимости от начальных и конечных размеров наибольших кусков и частиц материала измельчение подразделяется на следующие виды:

Вид измельчения	d_n мм	d_k мм
Крупное	1500...2000	250...25
Среднее	200...25	25...5
Мелкое	25...5	5...1
Тонкое	5...1	1...0,075
Коллоидное	0,2...0,1	До $1 \cdot 10^{-4}$

2. Физические основы измельчения.

Измельчение материалов производится **раздавливанием, раскалыванием, ударом и истиранием**.

Выбор метода измельчения зависит от крупности и прочности кусков измельчаемых материалов.

Прочные и хрупкие материалы измельчаются раздавливанием и ударом, **прочные и вязкие** — раздавливанием, вязкие материалы **средней прочности** — истиранием, ударом и раскалыванием.

Измельчение проводят в один или несколько приемов, в **открытых** или **замкнутых** циклах.

При измельчении в **открытом** цикле куски материала проходят через измельчающую машину один раз. В открытом цикле проводят, как правило, крупное и среднее дробление.

При измельчении в **замкнутом** цикле после измельчающей машины устанавливают классифицирующее устройство, с помощью которого куски, превышающие установленный конечный размер, вновь транспортируются в измельчающую машину на повторное дробление.

Процессы измельчения связаны с затратой большого количества энергии. Расход энергии на измельчение может быть определен из существующих теорий измельчения.

Поверхностная теория исходит из того, что при измельчении работа расходуется на преодоление сил молекулярного притяжения по поверхностям разрушения материала. Из этой теории следует, что работа, необходимая для измельчения, пропорциональна вновь образующейся поверхности измельчаемого материала.

Объемная теория исходит из того, что при измельчении работа расходуется на деформации материала до достижения предельной разрушающей деформации. Отсюда следует, что работа, необходимая для измельчения, пропорциональна уменьшению объема кусков материала перед их разрушением.

Полная работа внешних сил выражается уравнением **Рейбиндера**

$$A = A_d + A_n = K_1 \Delta V + K_2 \Delta F$$

где A_d — работа, затрачиваемая на деформацию объема разрушаемого куска, Дж; A_n — работа, затрачиваемая на образование новой поверхности, Дж;

K_1 — коэффициент пропорциональности, равный работе деформирования единицы объема тела; ΔV — изменение объема разрушаемого тела; K_2 — коэффициент пропорциональности, равный работе, затрачиваемой на образование единицы новой поверхности; ΔF — приращение вновь образованной поверхности.

На основании **закона Гука** работу деформации (в Н-м) материала при сжатии можно определить по соотношению

$$\dot{R}_A = \frac{\sigma^2 \Delta V}{2E}$$

где σ — разрушающее напряжение сжатия, Н/м²; ΔV — уменьшение объема кусков материала в результате их деформации перед разрушением, м³; E — модуль упругости материала, Н/м².

Как видно из уравнения (3), **работа**, затрачиваемая на разрушение материала, зависит от **разрушающего напряжения** и **модуля упругости** материала.

С учетом (3) получим

$$A = [\sigma^2 \Delta V / (2E)] + K_2 \Delta F.$$

В случае крупного дробления с малой степенью измельчения можно пренебречь работой, затрачиваемой на образование новой поверхности, и, учитывая, что $\Delta V \sim D^3$, получим

$$A = K_1 \Delta V = K_1' D^3$$

где D^3 — характерный размер куска.

Уравнение (5) выражает гипотезу **Кика—Кирпичева: работа дробления пропорциональна объему дробимого куска.**

Для дробления с большой степенью измельчения можно пренебречь работой, затрачиваемой на деформирование объема куска. Тогда, учитывая, что $\Delta F \sim D^2$,

$$A = K_2 \Delta F = K_2' D^2$$

Это уравнение является выражением гипотезы *Риттингера*, согласно которой работа дробления пропорциональна величине вновь образованной при дроблении поверхности.

3. Конструкция измельчающих машин.

Щековые дробилки измельчают материал путем раздавливания и раскалывания в конической камере, образованной неподвижной и подвижной плитами, которые периодически сближаются. Раздавленный материал выпадает из дробилки во время обратного хода подвижной плиты.

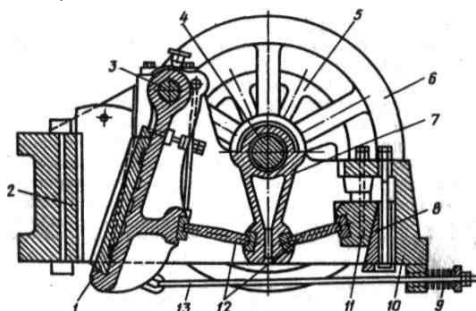


Рис. 1. **Щековая дробилка:** 1 — подвижная щека; 2 — неподвижная щека; 3 — ось подвижной щеки; 4 — эксцентриковый вал; 5 — шкив; 6 — маховик; 7 — шатун; 8, 11 — регулировочные клинья; 9 — пружина; 10 — станина; 12 — рычаги; 13 — тяга

Гирационные (конусные) дробилки применяют для крупного, среднего и мелкого измельчения. Измельчение происходит путем непрерывного раздавливания и излома кусков материала между конической дробящей головкой и корпусом, который имеет форму усеченного конуса (рис. 2).

Измельчение происходит путем непрерывного раздавливания и излома кусков материала между конической дробящей головкой и корпусом, который имеет форму усеченного конуса (рис. 2). Дробящая головка установлена в корпусе дробилки с эксцентриситетом, в результате чего она совершает эксцентричное вращательное движение. Когда дробящая головка приближается к одной стороне корпуса, измельченный материал выпадает с противоположной стороны через расширяющуюся в это время кольцевую щель между корпусом и головкой.

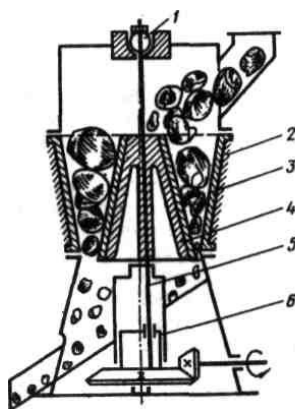


Рис. 2. **Гирационная дробилка:**

1 — шаровая опора; 2 — корпус;
3 — бронева плита; 4 — головка;

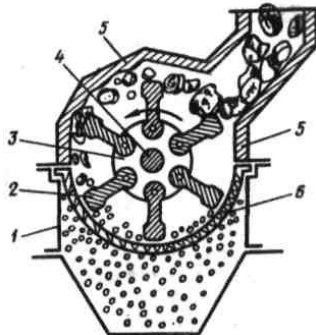


Рис. 3. **Молотковая дробилка:**

1 — корпус; 2 — дробящий молоток;
3 — диск; 4 — вал; 5 — бронева плита; 6 —

5 — вертикальный вал; 6 — экс-
центрик

колосниковая решетка.

В **дезинтеграторах** и **дисмембраторах** на дисках по концентрическим окружностям расположены пальцы-била. Каждый ряд пальцев одного диска расположен с небольшим зазором между двумя рядами пальцев другого диска.

В **протирочных машинах** для фруктов и овощей сок от мезги отделяется в результате протирания через протирочные сита.

Протирочная машина состоит из одной или нескольких протирочных камер. На рис. 4 показана протирочная машина с одной горизонтальной протирочной камерой. Камера представляет собой цилиндрический корпус, внутри которого расположена перфорированная металлическая решетка. Решетка установлена таким образом, что между ней и корпусом образуется кольцевой канал. По оси корпуса расположен ротор с насаженными на него протирающими лопатками. Между лопатками и решеткой имеется зазор, в котором и происходит измельчение материала в результате удара и истирания, а протирание происходит благодаря давлению, создаваемому лопатками ротора.

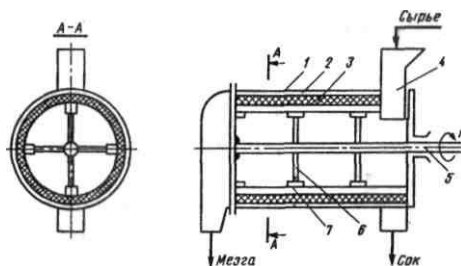


Рис. 4. Протирочная машина:

1 — корпус; 2 — кольцевой канал; 3 — решетка; 4 — воронка, 5 — ротор; 6 — спица; 7 — лопатка

1.3 Лекция №3 (2 часа).

Тема: «Классификация материалов»

1.3.1 Вопросы лекции:

1. Способы классификации материалов.
2. Физические основы классификации.
3. Конструкция разделяющих машин.

1.3.2 Краткое содержание вопросов:

1. Способы классификации материалов.

Для механических способов сепарирования сыпучих продуктов используют следующие признаки частиц.

1. Геометрические

- а) длина – максимальный размер частицы;
 - б) ширина – максимальный размер наибольшего по площади сечения, перпендикулярного линии длины;
 - в) толщина – минимальный размер того же сечения.
2. **Форма** – оценивается коэффициентом формы в виде отношения длины к толщине.
 3. **Плотность** – отношение массы частицы к ее объему.
 4. **Упругость** – оценивается коэффициентом восстановления нормальной скорости, т.е. отношение проекции скорости частицы после удара о неподвижную поверхность к такой же проекции скорости до удара.
 5. **Трение о поверхность**, оцениваемое коэффициентом сухого трения, т.е. отношением тангенциальной реакции связи к нормальной реакции при относительном движении.
 6. **Магнитная восприимчивость** – оценивается силой, с которой на массу в 1 г. действует магнитное поле с единичной магнитной индукцией и напряженностью.

2. Физические основы классификации.

Для разделения смеси зернистых материалов на фракций с узкими пределами размеров частиц применяют три вида классификаций:

- **механическая**, которая заключается в рассеве сыпучих материалов на ситах, решетках или других устройствах. При механической классификации через отверстия просеивающего устройства проходят частицы материала (**проход**), размеры которых меньше размеров отверстий. Не прошедшие через сита куски или частицы (**сход**) направляются на дополнительное измельчение;

- **гидравлическая классификация** — разделение смеси твердых частиц на фракции в зависимости от скорости оседания частиц в жидкости;

- **воздушная сепарация** — разделение смеси твердых частиц на фракции в зависимости от скорости отстаивания частиц в воздухе.

Механическая классификация, которая также называется сепарированием (грохочением), применяется для разделения частиц размерами от нескольких сантиметров до долей миллиметра. Классификацию проводят на рассеивающих устройствах, называемых **грохотами** или **сепараторами**. Для рассеивания материалов используют металлические или другие сита, решета из металлических листов со штампованными отверстиями, решетки из параллельных стержней — колосников.

Классификация материалов происходит при движении их относительно перфорированной поверхности. При этом поверхность может быть неподвижной, установленной под углом к горизонту большим, чем угол трения материала, либо движущейся.

В результате классификации получают два продукта: (*проход*) и (*сход*). Проход — частицы, прошедшие через рассеивающее устройство, Сход — куски (частицы), не прошедшие через рассеивающее устройство.

Классификация бывает *однократной и многократной*. При однократной классификации материал просеивается через одно сито, при многократной — через несколько сит.

3. Конструкция разделяющих машин.

Плоский качающийся грохот, который широко применяется в промышленности.

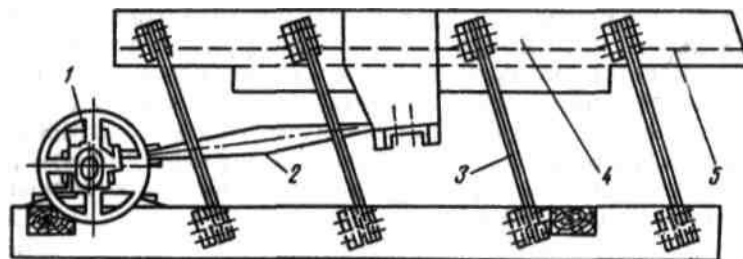


Рис. 7. Качающийся грохот: 1 — эксцентрик; 2 — шатун; 3 — пружина; 4 — корпус; 5 — сито.

Для очистки зерна, зерновых, крупяных и бобовых культур от сорных и зерновых примесей используют горизонтальные или вертикальные цилиндрические *зерноочистительные сепараторы*. Разделение в таких сепараторах происходит на металлическом сите.

Гидравлическая классификация смесей твердых частиц на фракции по скорости осаждения их в жидкости подчиняется общим законам осаждения твердых тел. Гидравлическая классификация осуществляется в горизонтальном или восходящем потоке воды. Скорость потока выбирают такой, чтобы из классификатора выносились частицы, меньшие определенного размера, — верхний продукт, а в классификаторе осаждались частицы больших размеров, обладающие большей скоростью осаждения, — нижний продукт. Для классификации под действием центробежной силы используют *гидроциклоны*.

Воздушная сепарация отличается от гидравлической классификации тем, что скорость осаждения частиц в воздухе значительно больше скорости осаждения частиц в воде. Воздушная сепарация осуществляется в восходящем потоке воздуха в циклонных аппаратах.

На рис. 8 показана схема центробежного сепаратора. Обычно такой сепаратор устанавливают на линии отходящего воздушного потока от мельницы. Крупные части отделяются в кольцевом канале и конусе, где частицы под действием центробежной силы отбрасываются на стенки конуса. Крупные частицы соскальзывают со стенок конуса и выгружаются через патрубки 4 и 5. Воздух вместе с мелкими неотделившимися частицами удаляется через патрубок в циклон.

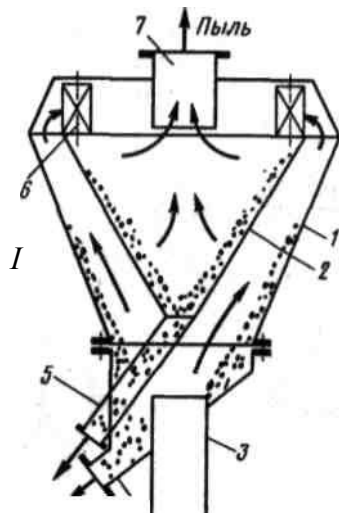


Рис. 8. Схема центробежного сепаратора:
— корпус; 2 — «внутренний конус»; 3 — патрубок для ввода исходного продукта; 4, 5 — патрубки для отвода крупных частиц; 6 — направляющая лопатка; 7 — патрубок для вывода пыли

1.4 Лекция №4 (2 часа).

Тема: «Прессование материалов»

1.4.1 Вопросы лекции:

1. Способы прессования материалов.
2. Физические основы прессования.
3. Конструкция прессующих машин.

1.4.2 Краткое содержание вопросов:

1. Способы прессования материалов.

Прессование заключается в том, что обрабатываемый материал подвергают внешнему давлению в специальных прессах.

Под избыточным давлением проводят обезвоживание, брикетирование, формование и штампование различных пищевых материалов.

Обезвоживание под давлением применяют в ряде отраслей пищевой промышленности: в сахарном производстве для отжима воды из свекловичного жома, сока из сахарного тростника, в жировом производстве для выделения из семян подсолнечника растительного масла, в производстве соков для выделения сока из ягод и плодов и в других производствах.

Брикетирование используют для получения брикетов, т. е. брусков спрессованного материала прямоугольной или цилиндрической формы.

Брикетирование применяют в сахарном производстве для получения брикетов свекловичного жома и сахара-рафинада. Брикетирование широко распространено в производстве пищевых концентратов и лекарственных препаратов, в кондитерском и в комбикормовом производствах, в процессах утилизации отходов производства и др.

Разновидности брикетирования — **таблетирование и гранулирование**. Таблетки и гранулы имеют меньшие размеры по сравнению с брикетами.

Промышленностью выпускаются гранулированные чай, кофе, пищевые концентраты, конфеты и другие продукты.

Формование пластических материалов применяют в хлебопекарном, кондитерском, макаронном, комбикормовом и других производствах для придания изделию заданной формы. При формовании часто используют экструзию.

2. Физические основы прессования.

Обезвоживание продуктов применяют для выделения жидкости, когда она является ценным продуктом или когда с обезвоживанием ценность продукта увеличивается.

Обезвоживание проводят под действием избыточного давления, которое прикладывается к материалу. Избыточное давление может быть приложено к материалу двумя способами: давлением поршня в прессах или действием центробежной силы в центрифугах.

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

В сахарорафинадном производстве прессы применяют для получения брусков сахара-рафинада.

Основная характеристика процесса брикетирования — зависимость между приращением давления прессования Δp и уменьшением коэффициента уплотнения прессуемого вещества

$$\beta \ (\beta = V/V_1 = h/h_1)$$

где β - коэффициент уплотнения

V и V_1 — объем продукта до и после прессования; h и h_1 — высота брикета до и после прессования).

Давление прессования складывается из давления на уплотнение продукта и давления для преодоления сил трения продукта о пресс-форму.

С. М. Гребенюком получено выражение для описания процесса прессования .

$$\Psi \ln p/p_0 = \beta - \beta_0$$

где Ψ — модуль прессуемости; p, p_0 — соответственно конечное и начальное давления сжатия;

β и β_0 — конечный и начальный коэффициенты уплотнения.

Гранулирование и формование проводят в экструдерах с целью получения полуфабрикатов или готовых изделий при комплексном воздействии давления, температуры, влажности и напряжения сдвига. Преимущества экструзии состоят в совмещении в одном экструдере нескольких процессов: диспергирования, перемешивания, гомогенизации, термической обработки (охлаждения), формования и сушки пищевых материалов. Экструзию применяют при выработке изделий из теста, таких как макароны, сухие завтраки, кондитерские изделия, детское питание, гранулированные корма. Готовый продукт, выработанный таким образом, или полуфабрикат называют экструдатом.

Форма экструдата определяется формой отверстий в матрице, которую устанавливают на выходе материала из экструдера.

Экструзия бывает *холодной, тепловой и варочной*. При холодной экструзии 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. Тепловую экструзию используют для частичной клейстеризации крахмалсодержащих материалов влажностью 20...40% с последующей обжаркой или выпечкой. При варочной экструзии во время нагревания в перерабатываемом материале происходят необратимые биофизические изменения прежде всего белков, крахмала и сахара.

Экструдат затем сушат или обжаривают и покрывают вкусовыми добавками. Способом варочной экструзии получают сухие завтраки, хлебцы, сухие напитки, супы, мясопродукты.

3. Конструкция прессующих машин.

В пищевой промышленности применяют прессы самых разнообразных конструкций. Их можно разделить на две большие группы: *гидравлические и механические*.

Гидравлический пресс работает по законам гидравлики. Основным узел прессы — рабочий цилиндр, внутри которого перемещается плунжер, соединенный с подвижной плитой. Плунжер приводится в движение жидкостью высокого давления. Прессуемый материал помещается между подвижной и неподвижной плитами.

Сила давления, создаваемая поршнем на материал, прямо пропорциональна его площади:

$$P = pF$$

где p — давление в гидросистеме, Н/м²; F — площадь поршня, м².

Гидравлические прессы широко применяют при переработке фруктов и овощей с целью получения соков, для производства ликеров и эссенций.

Наклонный шнековый пресс (рис. 17) предназначен для отжатия жома.

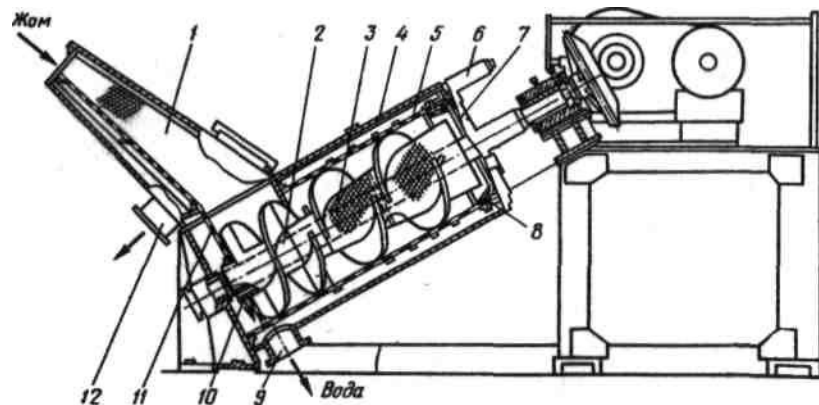


Рис.9. Наклонный шнековый пресс:

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 — штуцер; 10 — отверстие для удаления воды; 11 — дополнительная поверхность фильтрования; 12 — штуцер для отвода воды.

Двухшнековый пресс (рис. 10) оборудован двумя параллельно установленными шнеками, вращающимися навстречу друг другу. В корпусе и крышках шнека имеются цилиндрические фильтрующие сита с коническими отверстиями, изготовленные из нержавеющей стали.

Конструкция пресса позволяет быстро проводить процесс обезвоживания.

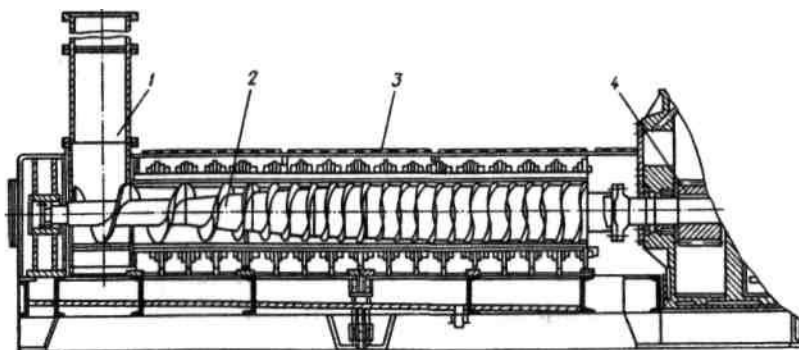


Рис. 10. Двухшнековый пресс: 1 — загрузочный бункер; 2 — шнек; 3 — крышка; 4 — привод.

Процесс *экструзии* проводят в экструдерах с одним или несколькими шнеками, установленными в одном корпусе. Технологическая часть экструдера состоит из корпуса, в котором вращаются один или два шнека, смесительных дисков, разгрузочных устройств, приспособления для смены набора фильтров. Корпус, как правило, обогревается электрическими нагревателями сопротивления, а шнеки охлаждаются при необходимости водой, циркулирующей через отверстия в секциях корпуса и в пустотелых валах шнека.

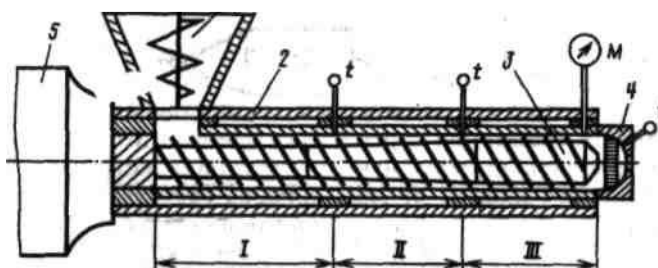


Рис. 11. **Схема одношнекового экструдера:** 1 — загрузочная воронка; 2 — корпус; 3 — шнек; 4 — фильера; 5 — привод; г — термодатчики; М — датчик давления

Гранулирование окатыванием применяют в кондитерской промышленности при производстве конфет, состоящих из ядра и оболочки. Наслоение оболочки на ядро осуществляют в дражировочных грануляторах.

Дражировочный гранулятор представляет собой чашеобразный корпус с вогнутым дном, который совершает сложное движение в горизонтальной плоскости. Чаша вращается вокруг собственной оси и вокруг вала привода (рис. 20). Такое сложное движение чаши создает восходящий винтообразный поток порошка. В результате происходит окатывание ядра оболочкой, что приводит к росту гранул. Ядром служат обычно кристаллы сахара, изюм и орехи, ягоды и т. д. Оболочка состоит из сахарной цедры, порошка какао, кофе.

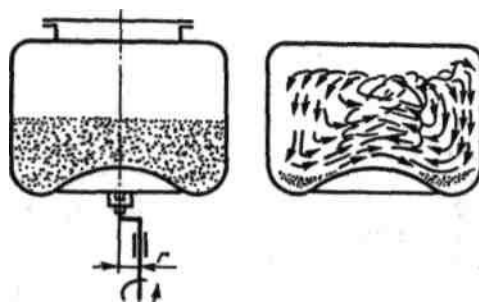


Рис. 12. **Схема движения частиц в дражировочном грануляторе.**

1.5. Лекция №5 (2 часа).

Тема: «Моделирование процессов и аппаратов»

1.5.1 Вопросы лекции:

1. Виды моделирования .
2. Геометрическое подобие аппаратов
3. Теоремы подобия

1.5.2 Краткое содержание вопросов:

1. Виды моделирования .

Процессы пищевой технологии характеризуются большим количеством и многообразием параметров, определяющих протекание процессов, значительным количеством внутренних связей между параметрами. Чтобы ограничить такой большой поток информации о процессе, создают его модель, которая отражает отдельные явления изучаемого процесса.

Процесс моделирования включает сравнение модели с явлением (модель считается удовлетворительной, если расхождение невелико) и сравнение нашего ожидания с показаниями модели.

Применяют два вида моделирования: **физическое** и **математическое**. При физическом моделировании изучение данного процесса происходит на физической модели. Математическое моделирование предусматривает математическое описание модели изучаемого процесса. При этом физический процесс заменяют алгоритмом, моделирующим его. Затем устанавливают адекватность модели изучаемому процессу.

Методы математического моделирования в сочетании с ЭВМ позволяют при относительно небольших материальных затратах изучать различные варианты аппаратурно-технологического оформления процесса, находить оптимальные.

При математическом моделировании используют также свойство изоморфности дифференциальных уравнений, которое является отражением единства законов природы, и позволяет с помощью однотипных дифференциальных уравнений описать различные по своей физической природе явления. Существует аналогия между процессами, различными по своей сущности: электрическими, гидродинамическими, тепловыми и массообменными. Эти процессы описываются однотипными дифференциальными уравнениями:

перенос электричества (закон Ома) —

$$i = -(1/R)(dU/dx);$$

перенос количества энергии (закон трения Ньютона) —

$$\tau = -\mu(dv/dx);$$

перенос вещества (закон Фика) —

$$m = -D(dc/dx)$$

перенос теплоты (закон Фурье) —

$$q = -\lambda(dt/dx),$$

Где: dU/dx , dv/dx , dc/dx , dt/dx - градиенты соответственно напряжения, скорости, концентрации и температуры, здесь i - сила тока; τ - касательное напряжение; m - массовый поток; D - коэффициент диффузии; q - тепловой поток; R - сопротивление.

2. Геометрическое подобие аппаратов

Геометрическое подобие аппаратов

Заключается в том, что отношение всех сходственных размеров сравниваемых аппаратов является величиной постоянной. Например, если два аппарата (рис. 108) геометрически подобны, то

$$H'/H'' = h'/h'' = D'/D'' = d'/d'' = K_l;$$
$$H' = K_l H''; h' i = K_l h'' \text{ и т.д.,}$$

Где: K_l - масштабный коэффициент геометрического преобразования, являющийся постоянной величиной

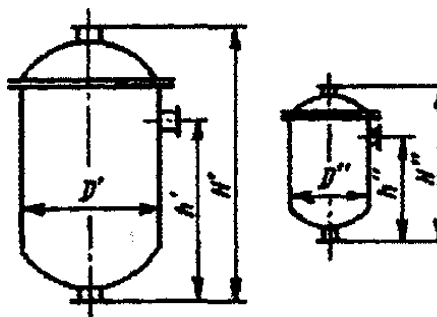


Рис. 5. Геометрически подобные сравниваемых аппаратов

Наглядным примером геометрического подобия служат географические карты, которые различаются только масштабом.

Временное подобие заключается в том, что отношение между интервалами времени завершения аналогичных стадий процесса сохраняется постоянным.

Например, продолжительность нагрева смеси до температуры кипения в первом аппарате составляет τ'_1 , а во втором - τ_1'' . Продолжительность испарения определенного количества воды составляет соответственно τ'_2 и τ_2'' . Тогда временное подобие процессов будет характеризоваться соотношением

$$\tau'_1 / \tau_1'' = \tau'_2 / \tau_2'' = K_\tau$$

откуда

$$\tau'_1 = K_\tau \tau_1''; \quad \tau'_2 = K_\tau \tau_2'';$$

где K_τ - масштабный множитель временного подобия.

Временное подобие процессов называется гомохронностью. В случае, когда $K_\tau = 1$, имеет место синхронность процессов, являющаяся частным случаем гомохронности.

Подобие физических величин имеет место при соблюдении геометрического и временного подобия. В этом случае говорят также о подобии полей физических величин.

3. Теоремы подобия

Первую теорему подобия можно формулировать так: при подобии процессов равны все критерии подобия.

Вторая теорема подобия (теорема Федермана—Бэкингема) утверждает, что результаты опытов следует представлять в виде зависимостей между критериями. Функциональная зависимость между критериями подобия называется **критериальным уравнением**. Критериальные уравнения описывают всю группу подобных процессов. Это обстоятельство имеет большое практическое значение и позволяет моделировать промышленный объект на подобной лабораторной модели.

Вид критериального уравнения определяется экспериментальным путем. Во многих случаях эта зависимость представляется в виде степенных функций.

Третья теорема подобия (теорема М. В. Кирпичева, А. А. Гухмана) гласит, что критериальные уравнения применимы только для подобных процессов.

Явления подобны, если их определяющие критерии численно равны, а следовательно, равны и определяемые критерии.

В заключение можно констатировать, что исследование процессов методом теории подобия состоит из получения математического описания процесса с помощью дифференциальных уравнений и условий однозначности, преобразования этих

дифференциальных уравнений (или дифференциального уравнения), как показано выше, в критериальное уравнение и нахождения конкретного вида этого уравнения на основании экспериментального изучения процесса.

1.6. Лекция №6 (2 часа).

Тема: «Способы разделения неоднородных систем. Перемешивание»

1.6.1 Вопросы лекции:

1. Виды гетерогенных систем.
2. Способы разделения гетерогенных систем
3. Оборудование для разделения

1.6.2 Краткое содержание вопросов:

1. Виды гетерогенных систем

Неоднородными, или *гетерогенными*, называют системы, состоящие, как минимум, из двух фаз: *дисперсной* (внутренней), обычно находящейся в тонкораздробленном состоянии, и *дисперсионной* (внешней), окружающей частицы дисперсной фазы.

Суспензия состоит из жидкой дисперсионной и твердой дисперсной фаз. В зависимости от размера взвешенных твердых частиц суспензии делятся на грубые с частицами размером > 100 мкм; тонкие, когда размеры твердых частиц составляют $0,1 \dots 100$ мкм, и коллоидные растворы, содержащие твердые частицы размерами $< 0,1$ мкм.

Эмульсии состоят из двух жидких фаз, не растворяющихся одна в другой: дисперсионной и дисперсной. Размер частиц дисперсной фазы может колебаться в значительных пределах. Под действием гравитационной силы эмульсии обычно расслаиваются, однако тонкие эмульсии с размером капель дисперсной фазы менее $0,4 \dots 0,5$ мкм, а также содержащие стабилизаторы, становятся устойчивыми и не расслаиваются в течение продолжительного времени.

С увеличением концентрации дисперсной фазы может возникнуть состояние, когда дисперсная фаза обращается в дисперсионную и наоборот. Такой взаимный переход называется инверсией фаз.

Пены состоят из жидкой дисперсионной и газовой дисперсной фаз. По своим свойствам пены близки к эмульсиям.

Пыли и дымы состоят из газовой дисперсионной и твердой дисперсной фаз. Образуются *пыли* обычно при дроблении, смешивании и транспортировке твердых материалов. Размеры твердых частиц пыли составляют от 3 до 70 мкм. *Дымы* образуются при горении. Размер твердых частиц в дымах составляет $0,3 \dots 5$ мкм.

Туманы состоят из газовой дисперсионной и жидкой дисперсной фаз. Туманы образуются при конденсации. Размер жидких капель в тумане $0,3 \dots 3$ мкм. Пыли, туманы и дымы представляют собой *аэрозоли*.

2. Способы разделения гетерогенных систем

В пищевых производствах часто возникает задача разделения неоднородных систем на составные части.

Основные методы разделения неоднородных систем в пищевой промышленности — *осаждение, фильтрование и центрифугирование*.

Осаждение — процесс разделения жидких и газовых неоднородных систем под действием гравитационных сил, сил инерции (центробежной силы) или сил электрического поля. Соответственно различают *гравитационное отстаивание, циклонное и отстойное центрифугирование, электроочистку*.

Фильтрование — процесс разделения жидких и газовых неоднородных систем с использованием пористой перегородки, способной пропускать жидкость и газ, но задерживающей взвешенные частицы.

Фильтрование осуществляется под действием сил давления или центробежных сил. Соответственно различают *просто фильтрование и центробежное фильтрование*.

Фильтрование более эффективно для разделения суспензий, эмульсий и пылей, чем осаждение.

Мокрое разделение — процесс улавливания взвешенных в газе частиц жидкостью. Применяется для очистки газов и разделения суспензий.

Материальный баланс процесса разделения.

Разделению подлежит неоднородная система, состоящая из вещества *a* (дисперсионная фаза) и взвешенных частиц *b* (дисперсная фаза). G_c — количество исходной смеси, кг; x_c — содержание вещества *b* в исходной смеси, мас. %; G_n — количество продукта, кг; x_n — содержание вещества *b* в очищенном продукте, мас. %; G_0 — количество осадка, кг; x_0 — содержание вещества *b* в осадке, мас. %; ρ_a и ρ_b — плотности веществ *a* и *b*.

При отсутствии потерь веществ материальный баланс разделения можно представить так:

по общему количеству веществ:

$$G_c = G_n + G_0;$$

по количеству взвешенных веществ (дисперсной фазе)

$$G_c x_c = G_n x_n + G_0 x_0$$

где G_n и G_0 — количества смешанных продуктов;
 x_n и x_0 — массовые концентрации в этих продуктах взвешенных частиц;
 G_c — количество конечной смеси.

Совместное решение этих уравнений позволяет определять количество очищенного продукта:

$$G_n = \frac{G_c (x_0 - x_c)}{(x_0 - x_n)}$$

и количество осадка:

$$G_0 = \frac{G_c (x_c - x_n)}{(x_0 - x_n)}$$

Содержание взвешенных частиц в очищенном продукте и в осадке выбирается в зависимости от технологических требований и зависит от метода разделения.

Эффективность разделения характеризуется эффектом разделения:

$$\mathcal{E}_p = \frac{G_c x_c - G_n x_n}{G_c x_c}$$

Уравнениями (3) и (4) описывается также процесс смешения. Из уравнения может быть найдена концентрация взвешенного вещества в полученной смеси:

$$x_c = \frac{G_n x_n + G_0 x_0}{G_c}$$

3. Оборудование для разделения

Оборудование для отстаивания и осаждения по принципу действия делится на **гравитационные отстойники, отстойные центрифуги, гидроциклоны и сепараторы.**

Отстойники бывают периодического, непрерывного и полунепрерывного действия.

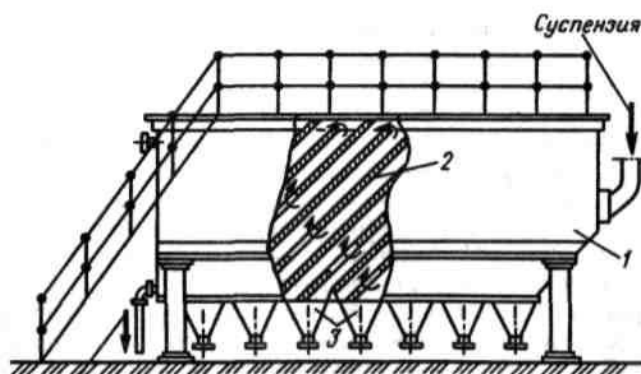
Отстойник **периодического** действия представляет собой плоский бассейн, без перемешивающих устройств. Бассейн заполняется суспензией, которая отстаивается в нем в течение обходимого для разделения времени.

Затем осветленный слой жидкости сливают (декантируют) через штуцера, расположенные выше слоя осадка. Осевший осадок (шлам) выгружают вручную.

Размеры и форма отстойников зависят от концентрации дисперсной фазы и размеров частиц. Продолжительность отстаивания зависит от вязкости дисперсионной фазы, которая снижается с повышением температуры.

Поэтому для ускорения процесса отстаивания суспензию подогревают (если это не противоречит технологии).

В отстойник *полунепрерывного* действия с наклонными перегородками (рис. 1) суспензия подается через штуцер и направляется с помощью наклонных перегородок попеременно сверху вниз и снизу вверх. Устройство перегородок увеличивает продолжительность пребывания суспензии и площадь поверхности отстаивания. Шлам собирается в конических бункерах и по мере накопления удаляется из них через краны.



Осветленная жидкость

Рис. 6.1. Отстойник полунепрерывного действия с наклонными перегородками:

1 — корпус; 2 — наклонные перегородки; 3 — бункера.

Осветленная жидкость отводится из отстойника через верхний штуцер.

Наибольшее распространение в промышленности получили отстойники *непрерывного действия*.

Непрерывнодействующий отстойник с гребковой мешалкой (рис. 2) представляет собой цилиндрический резервуар с коническим днищем и внутренним кольцевым желобом вдоль верхнего края отстойника. Мешалка с наклонными лопастями, на которых расположены гребки для перемещения осадка к разгрузочному люку, вращается с переменной частотой от 0,02 до 0,5 мин⁻¹.

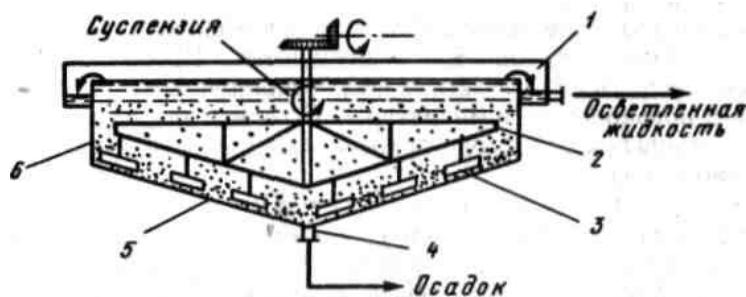


Рис. 6.2. Отстойник непрерывного действия с гребковой мешалкой:

1 — кольцевой желоб; 2 — мешалка; 3 — гребок; 4 — люк; 5 — коническое днище; 6 — цилиндрический резервуар.

Суспензия непрерывно подается по трубе в середину резервуара. Осветленная жидкость переливается в кольцевой желоб и отводится из отстойника.

Шлам удаляется при помощи диафрагменного насоса. Извлечение жидкости из шлама, если она является ценной для производства или ее извлечение необходимо по технологическим условиям, производится в установке для противоточной промывки. В таких отстойниках достигается равномерная плотность осадка, эффективное его обезвоживание.

В **многоярусных** отстойниках, которые представляют собой несколько отстойников, поставленных один на другой, или цилиндрический резервуар с коническим дном, внутри которого имеются конические перегородки, разделяющие отстойники на ярусы (рис. 3). В результате этого значительно снизилась громоздкость и увеличилась площадь поверхности отстаивания.

Такие отстойники используют на сахарных заводах для сгущения сатурационных соков.

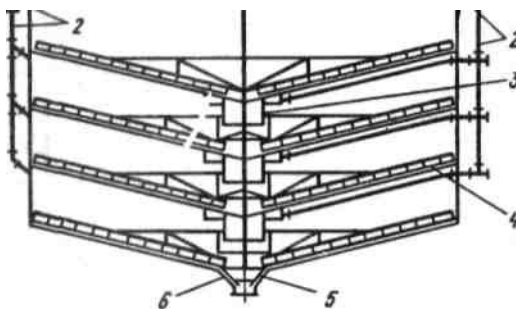


Рис. 6.3. Многоярусный отстойник:

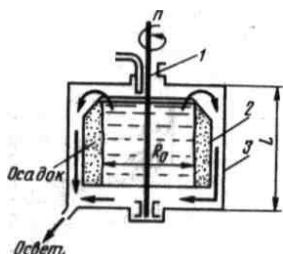
1 — распределительное устройство; 2 — трубы; 3 — стакан; 4 — гребковая мешалка; 5 — разгрузочный конус; 6 — скребки; 7 — коллектор; 8 — рама

Отстойник; для непрерывного разделения эмульсий (рис. 4) состоит из нескольких частей. Эмульсия подается в левую часть отстойника, откуда поступает в среднюю сепарационную камеру. Перегородки 2 позволяют регулировать высоту уровня смеси. В сепарационной части исходная смесь разделяется на составляющие под действием сил тяжести. Легкая жидкость поднимается и вытекает из отстойника через верхний штуцер. Тяжелая жидкость опускается, проходит под правой перегородкой 3 и вытекает через нижний штуцер. Каналы для выхода жидкости образуют сообщающиеся между собой сосуды.

Центрифуги могут быть с вертикальным и горизонтальным расположением вала и барабана, **периодического** действия (подвод суспензии и выгрузка осадка производятся периодически), **полунепрерывного** (суспензия подается непрерывно, а осадок выгружается периодически) и **непрерывного** действия (подача суспензии и выгрузка осадка осуществляются непрерывно).

Отстойная центрифуга **периодического** действия с ручной выгрузкой осадка (рис. 5) состоит из барабана, насаженного на вращающийся вал и помещенного корпус. Под действием центробежной силы, возникающей при вращении барабана, твердые частицы осаждаются в виде сплошного слоя осадка на стенке барабана, а осветленная жидкость переливается в кожух и удаляется через расположенный внизу патрубков. По окончании процесса осадок выгружается из центрифуги.

Процесс в отстойной центрифуге состоит из разделения (осаждения) суспензии и отжима или уплотнения осадка.



Суспензия.

Рис. 6.4. Отстойная центрифуга:

1 — вал; 2 — барабан; 3 — корпус

Непрерывно действующие отстойные горизонтальные центрифуги со шнековой выгрузкой осадка (НОГШ) применяют в крахмалопаточном производстве для получения концентрированного крахмального осадка и в других производствах.

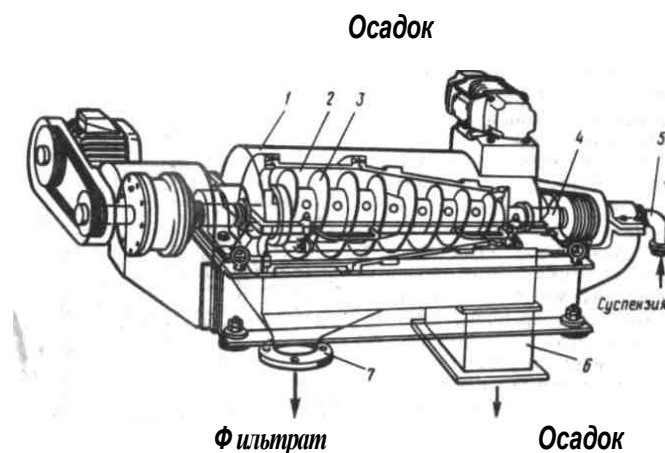


Рис. 6.5, Непрерывно-действующая отстойная горизонтальная центрифуга со шнековой выгрузкой осадка:

1 — корпус; 2 — ротор; 3 — шнековое устройство; 4 — полый вал; 5 — нейтральная труба, 6 — камера осадка; 7 — патрубок для фильтрата..

Центрифуга (рис.6. 5) состоит из ротора и внутреннего шнекового устройства, заключенных в корпус. Суспензия подается через центральную трубу в полый вал шнека. На выходе из этой трубы внутри шнека суспензия под действием центробежной силы распределяется в полости ротора.

Ротор вращается в кожухе в полых цапфах. Шнек вращается в цапфах, находящихся внутри цапф ротора. Под действием центробежной силы твердые частицы отбрасываются к стенкам ротора, а жидкость образует внутреннее кольцо, толщина которого определяется положением сливных отверстий на торце ротора. Образовавшийся осадок перемещается вследствие отставания скорости вращения шнека от скорости вращения ротора к отверстиям в роторе, через которые он выводится в камеру 6 и удаляется из центрифуги.

При движении вдоль ротора осадок уплотняется. При необходимости он может быть промыт.

Осветленная жидкость отводится через сливные отверстия в камеру фильтрата и удаляется через патрубок 7.

Производительность отстойных центрифуг определяется скоростью осаждения, фактором разделения и площадью поверхности осаждения в роторе центрифуги и описывается формулой:

$$V_{\tau} = \eta F v_{\kappa}$$

где η - коэффициент пропорциональности; $F = 2\pi R_0 L$ — площадь поверхности зеркала суспензии а барабане, м^2 (здесь R_0 — внутренний радиус слоя суспензии, м^2 ; L — длина барабана, м); v_{κ} — скорость центробежного осаждения, м/с.

1.7 Лекция №7 (2 часа).

Тема: «Разделение газовых неоднородных систем»

1.7.1 Вопросы лекции:

1. Способы разделения газовых гетерогенных систем
2. Оборудование для разделения
3. Псевдоожигение

1.7.2 Краткое содержание вопросов:

1. Способы разделения газовых гетерогенных систем

Очистку газов от взвешенных твердых или жидких частиц проводят в целях уменьшения загрязненности атмосферы и улавливания из отходящих газов ценных продуктов.

В промышленных условиях пыль может образовываться в результате проведения технологического процесса, например при сушке ряда пищевых продуктов, при транспортировке сыпучих материалов, в результате измельчения твердых тел дроблением, истиранием, размалыванием. Пыль, как правило, содержит твердые частицы размером 3..100 мкм.

Эффективность аппаратов для очистки газов оценивается степенью очистки

$$\eta = \frac{V_1 x_1 - V_2 x_2}{V_1 x_1}$$

Где V_1 и V_2 — объемные расходы соответственно запыленного и очищенного газа, м³/ч, x_1 и x_2 — концентрация взвешенных частиц соответственно в запыленном и очищенном газе, кг/м³.

Для очистки газовых потоков от взвешенных частиц используют несколько способов: *гравитационное осаждение, осаждение под действием инерционных и центробежных сил, фильтрование газового потока через пористую перегородку, мокрую очистку*, которая осуществляется в орошаемых водой скрубберах, *осаждение в электрическом поле*. Первые два способа применяют для очистки газов от крупных взвешенных частиц, остальные — для тонкой очистки газов от частиц размером менее 20 мкм. Для достижения требуемой степени очистки газового потока способы часто комбинируют.

2. Оборудование для разделения

Пылеосадительная камера (рис. 1) представляет собой прямоугольный аппарат с расположенными внутри горизонтальными полками. Запыленный газ через регулируемый шибер поступает в канал пылеосадительной камеры и распределяется между

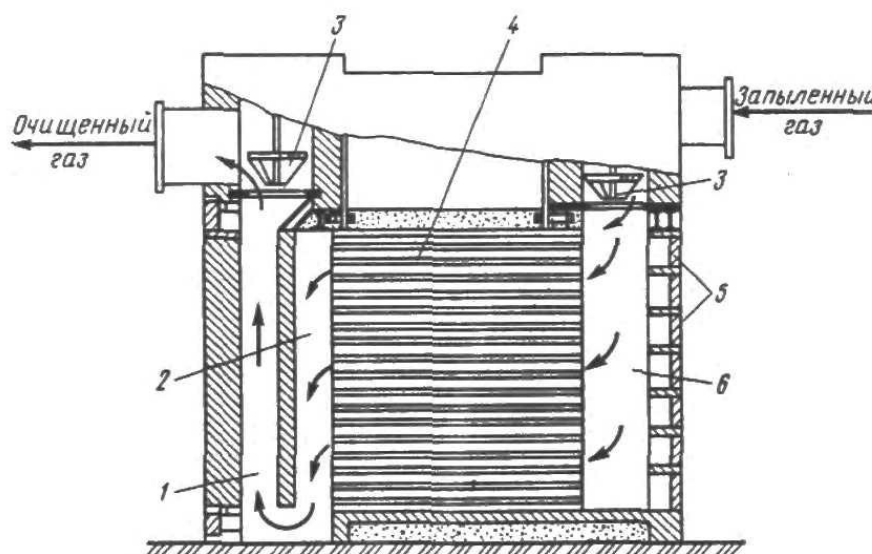


Рис. 7.1. Пылеосадительная камера:

1 — выходной канал; 2 — сборный канал; 3 — шиберы; 4 — горизонтальная полка; 5 — дверцы; 6 — всасывающий канал.

горизонтальными полками. Расстояние между полками составляет от 100 до 400 мм.

Назначение полок заключается в уменьшении пути отстаивания частиц пыли. Вместе с тем расположение полок в осадительной камере значительно увеличивает площадь поверхности отстаивания. При прохождении потока газа между полками твердые частицы оседают на их поверхности, а осветленный газ поступает в выхлопной канал и далее в газопровод. Скорость газового потока в пылеосадительной камере ограничена временем отстаивания: твердые частицы должны успеть осесть на поверхности полок за время пребывания потока в пылеосадительной камере.

Пыль, осевшая на полках, периодически удаляется скребками или смывается водой. Пылеосадительная камера разделена на два отделения, работающих попеременно (одно отделение очищается от пыли, а во втором в это же время происходит очистка газа), что обеспечивает непрерывность работы.

Пылеосадительные камеры используют для грубой предварительной очистки газов. В них отделяются частицы размером свыше 100 мкм. Степень очистки невелика — 30...40 %.

2. Оборудование для разделения

Отстойный газопровод с отбойными перегородками (рис. 2) предназначен для разделения крупнодисперсных пылей. Перегородки служат для завихрения газового потока. Возникающие при этом инерционные силы способствуют интенсивному осаждению взвешенных твердых частиц. Осевшая пыль выгружается из сборников 2 по мере накопления с помощью шиберов. Такие отстойники часто выполняют в системе газопроводов.

Инерционные пылеуловители характеризуются простотой устройства и компактностью. Степень очистки в них выше, чем в пылеосадительных камерах, и составляет примерно 60 %. В инерционных пылеуловителях улавливаются частицы размером более 25 мкм.

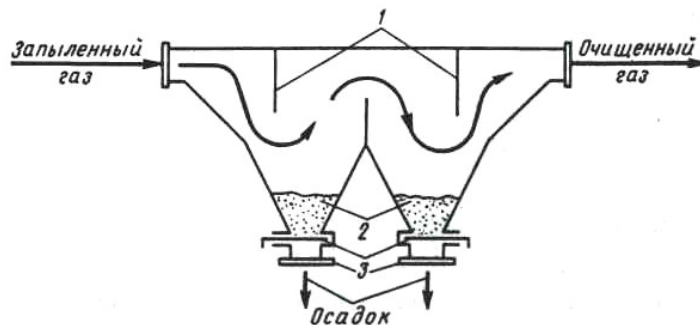


Рис. 9.2. Отстойный газопровод:
1 — отбойные перегородки; 2 — сборники пыли; 3 — шиберы

Циклоны позволяют разделять пыли в поле центробежных сил. Циклоны выпускают с корпусом диаметром от 100 до 1000 мм. Эффективность их работы характеризуется фактором разделения. Степень очистки газов зависит от конструкции циклона, размера частиц и их плотности. Например, если КПД циклона при улавливании частиц диаметром 25 мкм составляет 95 %, то при диаметре частиц 10 мкм КПД снижается до 70 %. Степень очистки газов от пыли определяют по нормам и номограммам, составленным на основании экспериментальных данных.

Циклон, представленный на рис. 7.3, обладает небольшим гидравлическим сопротивлением и позволяет достигать относительно высокой степени очистки. Сущность циклонного процесса заключается в следующем: газовый поток со взвешенными частицами вводится в аппарат через входную трубу со скоростью 10...40 м/с. Благодаря тан-

генциальному вводу и наличию центральной выводной трубы поток начинает вращаться вокруг последней, совершая несколько витков при прохождении через аппарат. Под действием возникающих центробежных сил взвешенные частицы отбрасываются к периферии, оседают на внутренней поверхности корпуса, а затем соскальзывают в коническое днище и удаляются из циклона через патрубок. Освобожденный от взвешенных частиц поток выводится из циклона через выводную трубу.

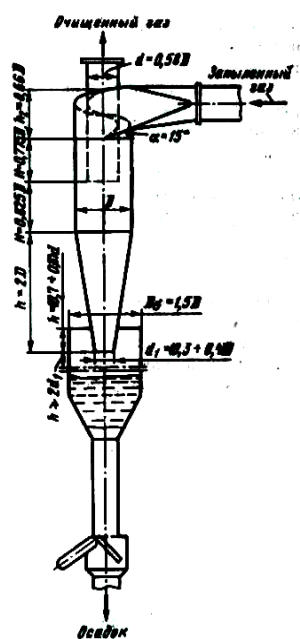


Рис. 9.3. Циклон конструкции НИИОГАЗа

1.8. Лекция №8 (2 часа).

Тема: «Теплообменные процессы»

1.8.1 Вопросы лекции:

1. Теплообмен
2. Способы теплообмена
3. Теплообменное оборудование.

1.8.2 Краткое содержание вопросов:

Теплообмен — самопроизвольный необратимый процесс переноса теплоты от более нагретых тел (или участков тел) к менее нагретым.

Теплота (количество теплоты) — энергетическая характеристика процесса теплообмена, которая определяется количеством энергии, отдаваемой или получаемой телом в процессе теплообмена.

К **теплообменным** относятся такие технологические процессы, скорость которых определяется **скоростью** подвода или отвода теплоты: нагревание, испарение (в том числе выпаривание), охлаждение, конденсация. Аппараты, в которых проводят эти процессы, называют **теплообменными**.

Теплопередача между средами может происходить в установившихся (стационарных) и не установившихся (нестационарных) условиях.

При установившемся (стационарном) процессе поле температур в аппарате не изменяется во времени. При не установившемся (нестационарном) процессе температуры изменяются во времени. Установившиеся процессы имеют место в **непрерывно действующих** аппаратах; не установившиеся процессы протекают в аппаратах **периодического** действия, а также при пуске и остановке аппаратов непрерывного действия и изменении режима их работы.

Основными кинетическими характеристиками процесса теплопередачи являются средняя разность температур, коэффициент теплопередачи, количество передаваемой теплоты (от этой величины зависят размеры теплообменной аппаратуры).

Связь между количеством передаваемой теплоты и площадью поверхности теплообмена определяется **основным уравнением теплопередачи**:

$$dQ = KF \Delta t_{cp} d\tau$$

которое для установившегося процесса имеет вид:

$$Q = KF \Delta t_{cp}$$

где dQ — количество переданной теплоты; K — коэффициент теплопередачи между средами; F — площадь поверхности теплообмена; Δt_{cp} — разность температур между средами — движущая сила процесса; $d\tau$ — продолжительность процесса.

Коэффициент теплопередачи показывает, какое количество теплоты (в кДж) передается от одного теплоносителя к другому через разделяющую стенку площадью 1 м^2 в течение 1 ч при разности температур между теплоносителями 1 град.

Площадь поверхности теплообмена (теплопередачи) аппарата определяется по формуле:

$$F = \frac{Q}{K \Delta t_{cp}}$$

Чтобы воспользоваться уравнением, необходимо знать количество переданной теплоты, которое определяется из теплового баланса, среднюю разность температур и коэффициент теплопередачи между средами.

Передача теплоты может осуществляться **теплопроводностью, тепловым излучением и конвекцией**.

2. Способы теплообмена

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

Теплопроводностью называется процесс переноса тепловой энергии от более нагретых участков тела к менее нагретым в результате теплового движения и взаимодействия микрочастиц. В результате теплопроводности температура тела выравнивается.

Поверхность тела, все точки которой имеют одинаковую температуру, называется изотермической поверхностью.

Температуры внутри тела (среды) изменяются в направлении от одной изотермической поверхности к другой. Наибольшее изменение температуры происходит по нормали к изотермическим поверхностям. Предел отношения изменения температуры Δt к расстоянию между изотермическими поверхностями по нормали Δl называется **температурным градиентом**:

$$\text{grad } t = \lim(\Delta t / \Delta l)_{\Delta l \rightarrow 0} = dt / dl$$

Основной закон теплопроводности, установленный Фурье (1768—1830) и названный его именем, гласит, что количество теплоты dQ , переданное теплопроводностью, пропорционально градиенту температуры dt/dl , времени $d\tau$ и площади сечения dF , перпендикулярного направлению теплового потока:

$$dQ = -\lambda [dt/dl] F d\tau$$

λ – коэффициент теплопроводности среды, Вт/(м К) .

Коэффициент теплопроводности веществ зависит от их природы и агрегатного состояния, температуры и давления.

Для теплоизоляционных материалов коэффициент теплопроводности изменяется от 0,0116 до 0,006 Вт/(мК).

Дифференциальное уравнение теплопроводности, называемое также уравнением Фурье, описывает процесс распространения теплоты в среде. Его выводят на основе закона сохранения энергии и записывают в следующем виде

В качестве примера рассмотрим установившийся процесс передачи теплоты теплопроводностью через плоскую стенку от горячего теплоносителя к холодному.

Пусть температура стенки со стороны горячего теплоносителя равна t_{cm1} , а со стороны холодного — t_{cm2} ; теплопроводность материала стенки λ ; толщина стенки δ . Как видно из рис. температуры изменяются только в направлении оси x .

Уравнение, описывающее теплопроводность плоской стенки при установившемся режиме, имеет вид

$$Q = \lambda (t_{cm1} - t_{cm2}) F \tau$$

$\frac{\lambda}{\delta}$ - тепловая проводимость стенки

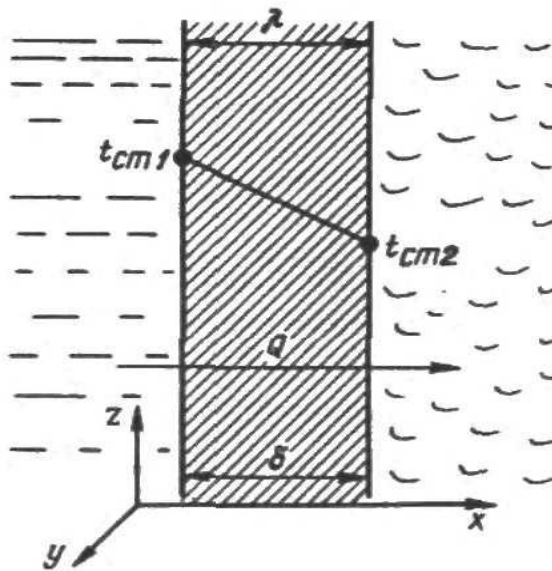


Рис.8.1- передача тепла через плоскую стенку теплопроводностью

Величина, обратная тепловой проводимости стенки, (δ/λ) называется **термическим сопротивлением стенки**.

ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Из всей лучистой энергии, которая попадает на поверхность тела, часть ее поглощается телом, часть отражается, а часть проходит через тело. В общем случае

$$(Q_A/Q) + (Q_R/Q) + (Q_D/Q) = 1$$

В этом уравнении первый член (Q_A/Q) характеризует поглощательную способность тела, второй (Q_R/Q) — отражательную, третий (Q_D/Q) — пропускательную.

В зависимости от значений членов, входящих в уравнение, различают **абсолютно черное тело** (когда вся падающая на него лучистая энергия поглощается им, т. е. $(Q_A/Q = 1)$), **абсолютно прозрачное тело** (когда вся падающая на тело лучистая энергия проходит через него, т. е. $(Q_D/Q = 1)$) и **абсолютно белое** (вся падающая на тело лучистая энергия отражается им, т. е. $(Q_R/Q = 1)$).

В природе нет абсолютно черных, белых и прозрачных тел. В технике приходится оперировать телами, называемыми **серыми**.

Закономерности теплового излучения описываются законами **Стефана—Больцмана, Кирхгофа и Ламберта**.

3. Теплообменное оборудование

Рекуперативные теплообменники в зависимости от конструкции разделяются на кожухотрубчатые, типа «труба в трубе», змеевиковые, пластинчатые, спиральные, оросительные и аппараты с рубашками. Особую группу составляют трубные **выпарные аппараты**.

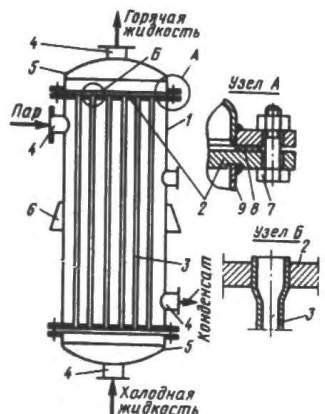


Рис. 8.2. Схема вертикального одноходового кожухотрубного теплообменника с неподвижными трубными решетками.

1—корпус; 2— трубная решетка, 3— греющая труба; 4 — патрубок; 5 — днища; б — опорная лапа; 7—болт; 8—прокладка; 9 — обечайка.

Один поток теплоносителя, например, жидкость, направляется в трубное пространство, проходит по трубкам и выходит из теплообменника через патрубок в верхнем днище. Другой поток теплоносителя, например пар, вводится в межтрубное пространство теплообменника, омывает снаружи греющие трубы и выводится из корпуса теплообменника через патрубок. Теплообмен между теплоносителями осуществляется через стенки труб.

Спиральные теплообменники состоят из двух спиральных каналов прямоугольного сечения, образованных металлическими листами (рис. 8.3). Внутренние концы спиралей соединены перегородкой. С торцов каналы закрыты крышками и уплотнены прокладками. У наружных концов каналов предусмотрены Отрубки для входа и выхода теплоносителей, два других патрубка уварены к плоским боковым крышкам.

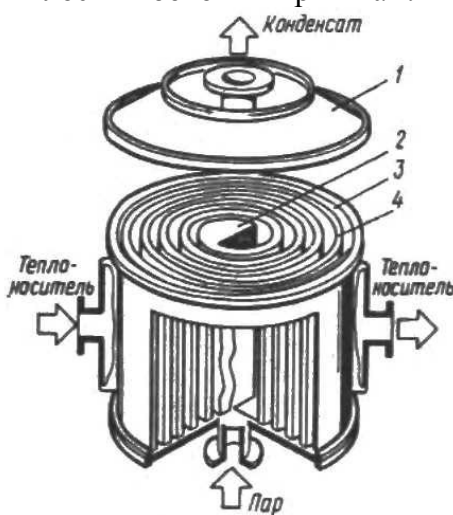


Рис. 8.3. Спиральный теплообменник:

1— крышка; 2 — перегородка; 3,4 — металлические листы.

Такие теплообменники используют для теплообмена между жидкостями и газами. Эти теплообменники не забиваются твердыми частицами, взвешенными в теплоносителях, поэтому их применяют для теплообмена между жидкостями со взвешенными частицами, например для охлаждения бражки на спиртоперегонных заводах.

Спиральные теплообменники компактны, позволяют проводить процесс теплопередачи при высоких скоростях теплоносителей с высокими коэффициентами

теплопередачи; гидравлическое сопротивление спиральных теплообменников ниже сопротивления многоходовых аппаратов при тех же скоростях теплоносителей.

Недостаток спиральных теплообменников—сложность изготовления, ремонта и очистки.

7. Пластинчатые теплообменники

Пластинчатые теплообменники компактны, обладают большой площадью поверхности теплопередачи, что достигается гофрированием пластин.

Значительная эффективность обусловлена большой величиной отношения площади поверхности теплопередачи к объему теплообменника. Это достигается благодаря высоким скоростям теплоносителей, а также турбулизации потоков гофрированными поверхностями пластин и низкому термическому сопротивлению стенок пластин.

Эти теплообменники изготавливают в виде модулей, из которых может быть собран теплообменник с площадью поверхности теплопередачи, необходимой для осуществления технологического процесса.

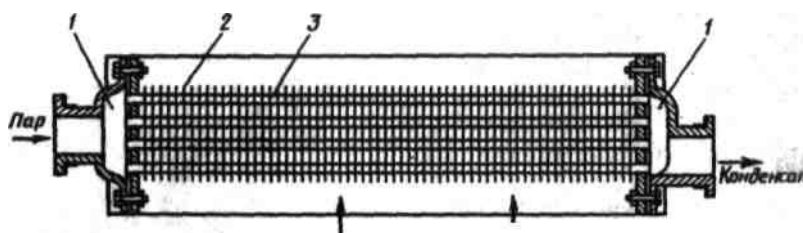


Рис. 8.4. Пластинчатый теплообменник

1 — коробка; 2 — ребро; 3 — труба

1.9 Лекция №9 (2 часа).

Тема: «Теоретические основы теплопередачи»

1.9.1 Вопросы лекции:

1. Теплопередача
2. Конвективный теплообмен
3. Теплообмен при изменении агрегатного состояния.

1.9.2 Краткое содержание вопросов:

1. Теплопередача

ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Теплопередача — теплообмен между двумя теплоносителями через разделяющую их твердую стенку.

Теплоноситель — движущаяся среда (газ, пар, жидкость), используемая для переноса теплоты.

В процессах теплопередачи участвует не менее *двух* сред (веществ) с различными температурами. Среда с *более* высокой температурой, отдающая при теплообмене теплоту, называется **горячим теплоносителем**, среда с более низкой температурой, воспринимающая теплоту, называется **холодным теплоносителем** (хладагентом).

В качестве **теплоносителей** в пищевой промышленности наибольшее распространение получили насыщенный водяной пар, вода, дымовые газы, а в качестве хладагентов — аммиак, фреоны, рассол хлорида кальция, воздух, азот. Выбор теплоносителя или хладагента определяется их назначением, температурами процесса, стоимостью.

ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Из всей лучистой энергии, которая попадает на поверхность тела, часть ее поглощается телом, часть отражается, а часть проходит через тело. В общем случае

$$(Q_A/Q) + (Q_R/Q) + (Q_D/Q) = 1$$

В этом уравнении первый член (Q_A/Q) характеризует поглощательную способность тела, второй (Q_R/Q) — отражательную, третий (Q_D/Q) — пропускательную.

В зависимости от значений членов, входящих в уравнение, различают **абсолютно черное тело** (когда вся падающая на него лучистая энергия поглощается им, т. е. $(Q_A/Q = 1)$), **абсолютно прозрачное тело** (когда вся падающая на тело лучистая энергия проходит через него, т. е. $(Q_D/Q = 1)$) и **абсолютно белое** (вся падающая на тело лучистая энергия отражается им, т. е. $(Q_R/Q = 1)$).

В природе нет абсолютно черных, белых и прозрачных тел. В технике приходится оперировать телами, называемыми **серыми**.

Закономерности теплового излучения описываются законами **Стефана—Больцмана, Кирхгофа и Ламберта**.

Закон Стефана—Больцмана устанавливает зависимость между лучеиспускательной способностью тела E , количеством энергии Q , излученной телом в течение 1 ч, и площадью поверхности тела F :

$$E = Q/F$$

Энергия излучения зависит от длины волн λ и температуры T . Связь между лучеиспускательной способностью и температурой абсолютно черного тела выражается соотношением:

$$E_0 = K_0 T^4$$

где K_0 — константа излучения абсолютно черного тела, Вт/(м²К⁴); $K_0 = (4,19 \cdot 10^{-8})$ Вт/(м²К⁴)

Для практических расчетов:

$$E_0 = \frac{C_0(T)^4}{100}$$

C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела Вт/(м²К⁴)

Закон Кирхгофа устанавливает соотношение между лучеиспускательной и поглощательной способностями тел.

$$E - E_0 Q_A / Q = 0, \quad E = E_0 Q_A / Q, \quad E_0 = EQ / Q_A$$

E и E_0 – лучеиспускательная способность тел.

Уравнение (12) является выражением закона Кирхгофа, который формулируется так: *отношение лучеиспускательной способности тел и их поглощательной способности равно лучеиспускательной способности абсолютно черного тела при той же температуре и зависит только от температуры.*

Закон Ламберта выражает изменение интенсивности излучения по различным направлениям и записывается в виде выражения:

$$dQ = (1/\pi) E d\psi \cos\varphi dF_1$$

где: $d\psi$ – телесный угол, под которым виден элемент dF .

Согласно этому закону, лучеиспускательная способность в направлении нормали в π раз меньше полной лучеиспускательной способности тела.

2. Конвективный теплообмен.

КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН (ТЕПЛООТДАЧА)

Теплоотдачей называется процесс теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой.

Интенсивность теплоотдачи характеризуется **коэффициентом теплоотдачи**, равным отношению плотности теплового потока на поверхности раздела к температурному напору между поверхностью теплообмена и средой (теплоносителем).

При конвективном теплообмене теплота распространяется в потоке жидкости или газа от поверхности твердого тела или к его поверхности одновременно конвекцией и теплопроводностью. От поверхности твердого тела к потоку жидкости она распространяется через пограничный слой за счет теплопроводности, от пограничного слоя в ядро потока жидкости или газа — в основном конвекцией. На интенсивность теплоотдачи существенное влияние оказывает характер движения потока жидкости или газа.

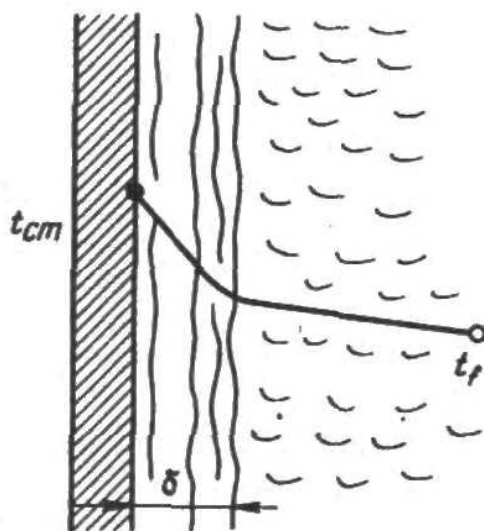


Рис. 13.2. Схема конвективного теплообмена

Схема конвективного теплообмена приведена на рис. 13.2.

Различают теплоотдачу при свободной и вынужденной конвекции. Под *свободной*, или естественной, конвекцией понимают перемещение частиц жидкости или газа в объеме аппарата или теплообменных устройств вследствие разности плотностей нагретых и холодных частиц жидкости или газа.

Скорость естественной конвекции определяется физическими свойствами жидкости или газа, разностью температур между горячими и холодными частицами и объемом, в котором протекает процесс.

Вынужденная, или принудительная, конвекция возникает под действием насоса или вентилятора и определяется физическими свойствами среды, скоростью ее движения, формой и размерами канала, в котором движется поток.

При вынужденной конвекции теплообмен происходит значительно интенсивнее, чем при естественной.

Основной закон теплоотдачи — **закон Ньютона** гласит: количество теплоты dQ , переданное от поверхности теплообмена к потоку жидкости (газа) или от потока к поверхности теплообмена, прямо пропорционально площади поверхности теплообмена F , разности температур поверхности t_{cm} и ядра потока t_f (или наоборот) и продолжительности процесса $d\tau$:

$$\begin{aligned} dQ &= \alpha(t_{cm} - t_f) F d\tau \\ dQ &= \alpha(t_f - t_{cm}) F d\tau \end{aligned}$$

где α — коэффициент теплоотдачи, который показывает, какое количество теплоты передается от теплообменной поверхности в 1 м^2 к омывающему ее потоку или от потока к поверхности теплообмена, равной 1 м^2 , в единицу времени (1 ч) при разности температур поверхности теплообмена и ядра потока 1 К .

Значение коэффициента теплоотдачи, который определяет скорость конвективного теплообмена, зависит от многих факторов: режима движения жидкости (газа), физических параметров жидкости (газа), формы и размера поверхности теплообмена и др.

Коэффициент теплоотдачи рассчитывают по критериальным уравнениям, которые получают методами теории подобия из дифференциального уравнения

конвективного теплообмена, дополненного уравнениями, характеризующими условие на границе раздела потока и стенки аппарата.

3. Теплообмен при изменении агрегатного состояния

ТЕПЛООБМЕН ПРИ ИЗМЕНЕНИИ АГРЕГАТНОГО СОСТОЯНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ

Особенность процессов теплообмена при испарении, конденсации, кристаллизации и плавлении заключается в том, что теплота подводится или отводится от веществ при постоянной температуре и распространяется в двух фазах. На рис. 13.3 представлены схемы изменения температур теплоносителей при изменении агрегатного состояния в результате теплоотдачи. Эти особенности теплоотдачи учитываются введением в критериальные уравнения конвективного теплообмена критерия фазового превращения

$$K=r/c\Delta t$$

где r — теплота парообразования; c — удельная теплоемкость.

Этот критерий характеризует отношение теплоты, расходуемой на изменение агрегатного состояния вещества, к теплоте перегрева или переохлаждения одной из фаз относительно температуры фазового превращения. Величина Δt представляет собой разность между температурой фазового превращения и температурой одной из фаз; произведение Δt является теплотой перегрева или переохлаждения вещества относительно температуры фазового превращения.

Для описания теплообмена при конденсации водяного пара используется критериальное уравнение, полученное на основе теории подобия,

$$Nu = f(Pr, K, Ga)$$

$Ga = g\ell^3/\nu^2$ – критерий Галилея, K – критерий фазового превращения.

НАГРЕВАНИЕ, ИСПАРЕНИЕ, ОХЛАЖДЕНИЕ, КОНДЕНСАЦИЯ

Нагреванием называется процесс повышения температуры материалов путем подвода к ним теплоты. Широко распространенными методами нагревания в пищевой технологии являются нагревание горячей водой или другими жидкими теплоносителями, насыщенным водяным паром, топочными газами и электрическим током.

Для этих целей применяют теплообменники различных конструкций.

Нагревание водой используют для повышения температуры и пастеризации пищевых продуктов при температурах ниже 100 °С. Для нагревания до температуры выше 100 °С применяют перегретую воду, находящуюся под избыточным давлением. Вода является доступным и дешевым, некоррозионно-активным теплоносителем, имеющим высокие теплоемкость и коэффициент теплоотдачи. Обычно обогрев водой осуществляется через разделяющую теплоноситель и продукт стенку аппарата.

При нагревании водой или другими жидкостями, например маслом, органическими теплоносителями, часто применяют циркуляционный способ обогрева. По этому способу

горячая вода (либо другой теплоноситель) циркулирует между нагревателем и теплообменником, в котором она отдает теплоту. Циркуляция может быть естественной или принудительной.

Естественная циркуляция происходит за счет разности плотностей горячего и холодного теплоносителей.

Более эффективным является способ обогрева при ***принудительной циркуляции***, которую осуществляют с помощью насоса.

1.10 Лекция №10 (2 часа).

Тема: «Массообменные процессы»

1.10.1 Вопросы лекции:

1. Основы массопередачи
2. Способы теплообмена
3. Перегонка и ректификация

1.10.2 Краткое содержание вопросов:

1. Основы массопередачи

ОСНОВЫ МАССОПЕРЕДАЧИ

Массопередача имеет место в процессах *абсорбции, перегонки и ректификации, экстракции и выщелачивания, сушки, адсорбции, кристаллизации и др.*

При *абсорбции* происходит селективное поглощение газов или паров жидкими поглотителями — абсорбентами, т. е. имеет место переход вещества из газовой или паровой фазы в жидкую.

При *перегонке* и *ректификации* жидкая смесь разделяется на составляющие компоненты. Происходит переход веществ из жидкой фазы в паровую и из паровой в жидкую.

При *экстракции* происходит извлечение одного или нескольких веществ из растворов или твердых веществ с помощью растворителей. При экстракции в системе жидкость—жидкость имеет место переход вещества из одной жидкой фазы в другую жидкую фазу.

Процесс извлечения веществ из твердого тела с помощью растворителя называют *выщелачиванием*. При выщелачивании вещество переходит из твердой фазы в жидкую.

При *адсорбции* происходит избирательное поглощение газов, паров или растворенных в жидкостях веществ твердым поглотителем — адсорбентом, способным поглощать один или несколько компонентов из их смеси. Процесс используется во многих производствах, где из смеси газов, паров или растворенных веществ необходимо извлечь тот или иной компонент. При адсорбции вещества переходят из газовой или жидкой фазы в твердую.

Сушка — это удаление влаги из твердых или жидких влажных материалов путем ее испарения. В этом процессе имеет место переход влаги из твердого влажного материала в паровую или газовую фазу.

При *кристаллизации* из жидкой фазы выделяется вещество в виде кристаллов. При этом происходит переход вещества из жидкой фазы в твердую в результате возникновения и роста кристаллов в растворе.

1. Кинетика массопередачи

КИНЕТИКА МАССОПЕРЕДАЧИ

Массопередача — процесс перехода вещества (или нескольких веществ) из одной фазы в другую в направлении достижения равновесия.

В массообмене участвуют, как минимум, три вещества: распределяющее вещество (или вещества), составляющее первую фазу; распределяющее вещество (или вещества), составляющее вторую фазу; распределяемое вещество (или вещества), которое переходит из одной фазы в другую.

Основные уравнения массопередачи могут быть получены из общего уравнения кинетики. Согласно этому уравнению скорость массообменных процессов прямо пропорциональна движущей силе процесса и обратно пропорциональна диффузионному (массообменному) сопротивлению.

Обозначив величину, обратную диффузионному сопротивлению, через $K=1/R$ (где R — диффузионное или массообменное, сопротивление), запишем:

$$dM/(Fd \tau) = k \Delta$$

где M — количество вещества, перешедшего из одной фазы в другую; F — площадь поверхности массопередачи; τ — продолжительность процесса; k — коэффициент скорости процесса, называемый в теории массопередачи коэффициентом массопередачи; Δ — движущая сила.

Нетрудно видеть, что $dM/Fd \tau$ является скоростью массопередачи, отнесенной к единице контакта фаз.

Если dM отнесено к единице времени, имеем:

$$dM = k \Delta dF.$$

При $k = \text{const}$ для всей поверхности массообмена

$$M = k \Delta$$

Уравнения (2) и (3) называют **основными уравнениями массопередачи**. Согласно этим уравнениям количество вещества, перешедшего из ядра одной фазы в ядро другой фазы, пропорционально разности его концентраций в ядрах фаз, площади поверхности фазового контакта и продолжительности процесса.

Коэффициент массопередачи показывает, какое количество вещества переходит из одной фазы в другую в единицу времени через единицу поверхности фазового контакта при движущей силе, равной единице.

3. Перегонка и ректификация

ПЕРЕГОНКА И РЕКТИФИКАЦИЯ

Перегонка и ректификация — наиболее распространенные методы разделения жидких однородных смесей, состоящих из двух или нескольких летучих компонентов.

Процессы перегонки и ректификации широко применяют в пищевой промышленности при получении технического и пищевого этилового спирта, в производстве ароматических веществ и др. **Перегонку** используют для грубого разделения смесей. Для наиболее полного их разделения применяют **ректификацию**.

Процессы перегонки и ректификации основаны на различной летучести компонентов смеси при одной и той же температуре. Компонент смеси, обладающий большей летучестью, называется **легколетучим**, а компонент, обладающий меньшей летучестью, **труднолетучим**. Соответственно легколетучий компонент кипит при более **низкой** температуре, чем труднолетучий. Поэтому их называют также **низкокипящим** и **высококипящим** компонентами.

В результате перегонки или ректификации исходная смесь разделяется на **дистиллят**, обогащенный легколетучим компонентом, и **кубовый остаток**, обогащенный труднолетучим компонентом. Дистиллят получают в результате конденсации паров в конденсаторе-дефлегматоре. Кубовый остаток получают в кубе установки.

ПРОСТАЯ ПЕРЕГОНКА

Перегонка представляет собой процесс однократного частичного испарения жидкой смеси и конденсации образовавшихся паров.

Простая перегонка может проводиться с отбором фракций, с дефлегмацией, с водяным паром или под вакуумом (молекулярная перегонка).

Фракционная перегонка заключается в постепенном испарении жидкости, находящейся в перегонном кубе (рис. 10.1). Образовавшиеся пары отводятся в холодильник и там конденсируются, а дистиллят собирается в сборнике. Кубовый остаток удаляется из куба после окончания процесса. Обогрев куба осуществляется насыщенным водяным паром или дымовыми газами.

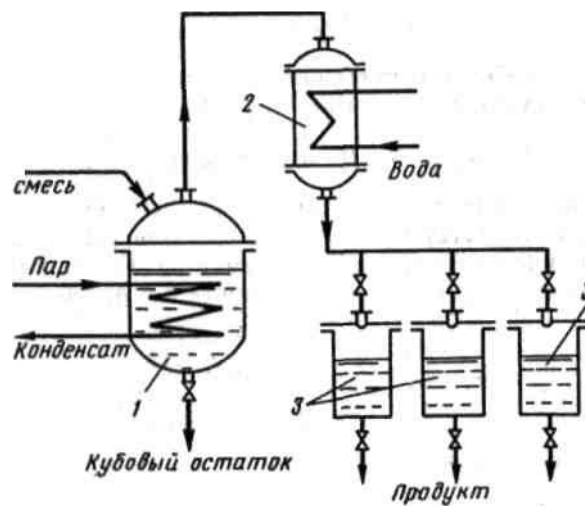


Рис. 10.1. Установка для простой перегонки:

1 – куб, 2—конденсатор; 3 — сборники дистиллята

Уравнение материального баланса по летучему компоненту за рассматриваемый промежуток времени может быть записано так:

$$Lx = (L-dL)(x-dx) + y_p dL.$$

где: L - масса смеси, находящейся в перегонном кубе, x – ее концентрация, y_p – состав пара .

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

2.1 Лабораторная работа № 1 (2 часа).

Тема: «Изучение процесса измельчения сыпучих материалов в молотковой дробилке»

2.1.1 Цель работы: изучить устройство и принцип работы лабораторной молотковой дробилки методику расчетов основных ее параметров.

2.1.2 Задачи работы:

1. Определить экспериментальным путем технологическую эффективность, производительность, степень измельчения, потребляемую мощность и другие параметры работы молотковой дробилки.

2.1.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. лабораторная молотковая дробилка;
2. лабораторный рассев;
3. набор сит;
4. измерительный инструмент;
5. секундомер;
6. весы;
7. инженерный калькулятор.

2.4.4 Описание (ход) работы:

Процесс измельчения широко применяется в мукомольной, комбикормовой, свеклосахарной, консервной, крахмалопаточной, спиртовой, пивоваренной, винодельческой и других отраслях промышленности.

Эффективным способом измельчения сырья является ударное разрушение, Машины ударного действия имеют лучшие технико-экономические показатели по сравнению с машинами другого принципа действия. Из всего многообразия машин ударного действия наиболее перспективными являются молотковые дробилки.

Эффективность измельчения на молотковых дробилках оценивается степенью измельчения, производительностью, удельным расходом энергии на проведение процесса

Степень измельчения материала можно определить по формуле

$$i = \frac{F_{изм}}{F_{исх}} \quad (4.1)$$

где: $F_{изм}$ - суммарная поверхность частиц измельченного продукта;

$F_{исх}$ - суммарная поверхность частиц исходного материала.

Учитывая сложность в определении суммарной поверхности частиц исходного материала и измельченного продукта, чаще находят степень измельчения более простым путем

$$i = \frac{d_{исх.ср}}{d_{изм.ср}} \quad (4.2)$$

где: $d_{ис.ср}$ - средний размер частиц исходного материала
 $d_{изм.ср}$ - средний размер частиц измельченного продукта,

Для определения среднего размера частиц до и после измельчения среднюю пробу материала просеивают при помощи рассевка - анализатора через набор сит с отверстиями разных размеров, взвешивают сходовые фракции и находят числовое значение размера частиц по следующей формуле:

$$d_{ср} = \frac{\sum_l^k d_i x_i}{\sum_l^k x_i} \quad (4.3)$$

где: d_i - средний размер частиц i -й сходовой фракции материала, который находится как полусумма размеров отверстий сита, с которого получен сход материала, и ближайшего сита, через которое прошел этот материал, мм,

x_i - масса i -й сходовой фракции материала, кг или % к массе просеиваемой навески.

Ориентировочный расчет производительности G (в кг/с) молотковых дробилок выполняют по эмпирической формуле

$$G = K_I D_v^2 L \rho n_p \quad , \quad (4.4)$$

где: K_I - эмпирический коэффициент, который зависит от типа и размеров отверстий ситовой поверхности, физико-механических свойств сырья и конструктивных особенностей молотковых дробилок;

ρ - объемная масса измельчаемого материала, кг/м³;

D_r - диаметр ротора дробилки, м;

L - длина ротора дробилки, м,

n_p - частота вращения ротора, с⁻¹.

Частоту вращения ротора определяют по следующей формуле:

$$n_p = \frac{n_{\Delta} D_{\Delta}}{D_{Д}} \quad (4.5)$$

где: $n_{\text{э}}$ - частота вращения ротора электродвигателя, с^{-1} ;

$D_{\text{э}}$ - диаметр шкива на валу электродвигателя, м.

$D_{\text{д}}$ - диаметр шкива на валу ротора дробилки, м.

Ориентировочно потребляемую мощность $N(\text{кВт})$ электродвигателя дробилки на процесс измельчения рассчитывают по эмпирической формуле

$$N = K_1 K_2 \rho D_p^2 n_p \quad (4.6)$$

где K_2 - эмпирический коэффициент, который в основном зависит от получаемой крупности и физико-механических свойств измельчаемого материала

Значение этих эмпирических коэффициентов следующие:

для сит с диаметром отверстий до 3 мм $K_1 = (3,6 \cdot 10^{-5} \dots 4,7 \cdot 10^{-5})$;

для чешуйчатых сит с диаметром отверстий 2,5х20 и для сит с диаметром отверстий от 4 ... 5 до 10 мм $K_1 = (6 \cdot 10^{-5} \dots 10,5 \cdot 10^{-5})$ (меньшее значение коэффициента K_1 в том и другом случаях принимают для сит с меньшим размером отверстий):

коэффициент $K_2 = 2,0 \dots 4,0$; причем меньшее значение коэффициента принимают при крупном размоле, а большее - при мелком размоле

Как видно из вышеизложенного, как производительность, так и расход энергии на измельчение во многом зависят от крупности (дисперсности) получаемого продукта. Крупность размола в молотковых дробилках в основном ограничивается размером и конфигурацией отверстий сита. Чем меньше размер отверстий сита в молотковой дробилке, тем мельче готовый продукт, получаемый после измельчения

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка (рис. 97), созданная на основе молотковой дробилки, состоит из следующих элементов: чугунного корпуса 1 с крышкой, по бокам которой установлена дека 2 ротора 3, бункера 5, задвижки 6, сита 7, электродвигателя 8, ваттметра 9, лабораторной емкости 10. Сита 7 сменные, диаметр отверстий их составляет 2, 3, 4, 5 мм и т. д.

Материал из бункера 5 поступает в рабочую камеру дробилки, где в результате ударного воздействия молотков 4 и материала о деку 2, а также вследствие истирания материала о деку и сито дробилки происходит интенсивное разрушение его. Измельченные до необходимой крупности частицы продукта проходят через сито 7 и поступают в емкость 10. Расход энергии электродвигателя 8 фиксируется ваттметром 9.

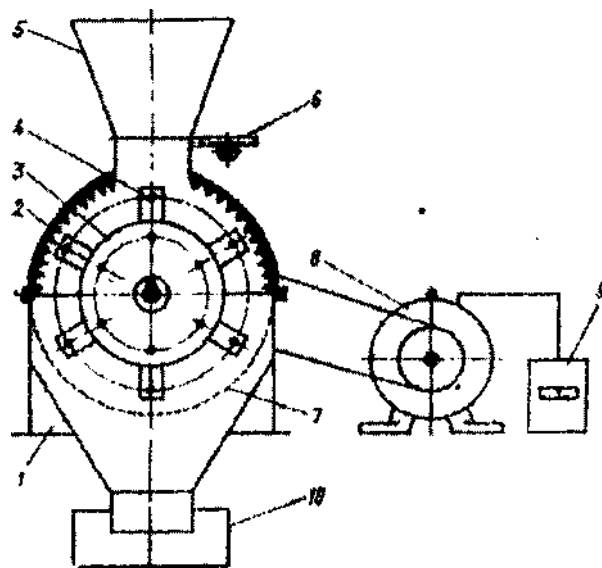


Рис. 97 Схема экспериментальной установки для испытания молотковой дробилки.

Методика проведения исследования

Из зернового (пшеница, ячмень, овес, кукуруза и т. д.) или какого либо другого испытываемого материала отбирают три навески по 0,1 кг каждая, которые просеивают в течение 300 с (5 минут) при помощи классификатора на наборе сит диаметром отверстий сверху в низ 10; 3,0; 2,5; 2,0; 1,0 мм и дно.

Форма 1

№ опыта и повторности	Остаток на сите (в %) с диаметром отверстий, мм					
	Дно	2,0	2,5	3,0	3,5	10
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆
1	2	3	4	5	6	7
1 опыт						
2 опыт						
Среднее значение						

Остаток на каждом сите взвешивают на весах, пересчитывают в процентах к общей массе навески, результаты вносят в форму 1 протокола испытаний и определяют среднее значение сходов с одинаковых сит.

По формуле (3), которая для этого случая примет вид:

$$d_{cp} = \frac{0,5x_1 + 1,5x_2 + 2,25x_3 + 2,75x_4 + 6,5x_5 + 11x_6}{100} \quad (4.7)$$

где: x_1 - средний остаток на дне, %,

x_2, x_3, x_4, x_5, x_6 - средний остаток на сите с отверстием диаметром 2,0;2,5; 3,0;3,5;10 мм,%, определяют средний размер частиц исходного продукта.

2. Навеску материала массой 5—10 кг засыпают в бункер молотковой дробилки, в которой установлено сито с наименьшим диаметром отверстий.

3. Включают двигатель дробилки и при помощи ваттметра определяют его мощность на холостом ходу N_{xx} (в кВт).

4. Постепенно открывая задвижку бункера, загружают дробилку до нагрузки на электродвигатель, близкой к оптимальной. Величину оптимальной нагрузки определяют ориентировочно по формуле (4.4).

5. В течение 40 - 90 с отбирают измельченный продукт, выходящий из дробилки (после отбора необходимо на дробилке отработать весь оставшийся материал), взвешивают и данные опыта записывают в форму 2

Форма 2.

№ опыта	Ø сита отверстия дробилки D_c мм	Масса навески m , кг	Время отбора навески, τ , сек.	Производительность G , кг/сек.	Расход энергии Вт		Удельный расход энергии ΔN (кВт с/кг)	Дисперсность d , мм	Степень измельчения, i	Коэффици- циент	
					На холостом ходу N_{xx}	На измельчение $N_{рАБ}$				K_1	K_2
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	2	1			100	210					
2	3	3			100	220					
3	4	5			100	230					
4	5	10			100	250					

Обработка опытных данных

1. Истинную производительность молотковой дробилки $G_{ист}$ (в кг/сек) определяют по формуле:

$$G_{ист} = \frac{m_l}{\tau} \quad (4.8)$$

где: m_l –масса отобранной навески измельченного продукта, кг.

τ - время, в течение которого отбирали навеску, с.

2. Согласно, методике, описанной выше, по формуле (4.7) определяют средний размер частиц измельченного продукта.

3. По формуле (4.2) вычисляют степень измельчения материала.
4. Из формул (4.4, 4.6) находят истинные значения коэффициентов K_1 и K_2 для данного материала и сита молотковой дробилки.
5. Удельный расход энергии ΔN , (в (кВт-с)/кг) определяют по формуле:

$$\Delta N = \frac{N_{РАБ} - N_{ХХ}}{G_{ИСТ}} \quad (4.9)$$

где: $N_{РАБ}$ - мощность электродвигателя дробилки при рабочей нагрузке (определяют по показанию ваттметра), в нашем случае формы 2 протокола испытаний, кВт,

Все полученные экспериментальным и расчетным путем данные записывают в форму 2 протокола испытаний.

Заменяют сито в молотковой дробилке и, не меняя положения задвижки бункера, проводят второй и другие опыты (но не менее 4 - 5).

По данным опытов строят графики изменения крупности (дисперсности) продукта $d_{cp} = f(D_c)$, степени измельчения $i = f(D_c)$ и удельного расхода энергии $\Delta N = f(D_c)$ в зависимости от диаметра отверстий сита D_c .

В заключение делают вывод о влиянии размера отверстий сита в молотковой дробилке на коэффициенты K_1 и K_2 - дисперсность, степень измельчения, удельный расход энергии на измельчение, а также на производительность дробилки.

2.2 Лабораторная работа № 2 (2 часа).

Тема: «Определение основных характеристик процесса классификации материалов в бурате»

2.2.1 Цель работы: изучить устройство и принцип работы лабораторного ситового сепаратора (бурата), методику расчетов основных ее параметров.

2.2.2 Задачи работы:

1. Определить экспериментальным путем технологическую эффективность по степени выделения сорной примеси, производительность и удельную нагрузку на рабочий орган лабораторного ситового сепаратора (бурата).

2.2.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. лабораторный зерновой ситовой сепаратор;
2. разборные доски;
3. шпатели;
4. совочки;
5. измерительный инструмент;
6. секундомер;
7. весы;
8. инженерный калькулятор.

2.5.4 Описание (ход) работы:

Ситовой сепаратор (бурат) служит для сортирования зерновой смеси на фракции по крупности и для очистки зерна от крупных и мелких сорных примесей. Сортирование компонентов зерновой смеси по ширине и толщине осуществляется на ситах, а по удельной парусности - в воздушном потоке.

Кроме этого, разделение компонентов производится по плотности, упругости, коэффициенту трения, магнитным свойствам и т.д.

При организации сепарирования примеси классифицируют по физическим признакам, положенным в основу сепарирования, выделяя следующие группы:

- мелкие примеси - это примеси, которые по своим размерам меньше размера любого зерна основного компонента;
- короткие примеси - примеси, короче длины зерна основного компонента (например, куколь в пшенице);
- длинные примеси - примеси, превосходящие в длину зерно основного компонента (например, овсюг в пшенице);
- лёгкие примеси, отличающиеся от зерна основного компонента по скорости витания в воздушном витания;

- металломагнитные, отличающиеся от зерна магнитной восприимчивостью или диэлектрической проницаемостью;

- трудноотделимые – мало - или не отличающиеся вовсе от зерна основного компонента по вышеперечисленным признакам, но отличающиеся плотностью, упругостью, коэффициентом трения и т. п. За основу разделения зерна и такого рода примесей принимают совокупность признаков;

- отличающиеся от зерна формой (например, трехгранный орешек татарской гречихи и продолговато-овальная зерновка в пшенице).

Наиболее часто встречаются примеси в виде семян сорных растений, солоmistых частиц, комочков земли, гальки, песка, семян других культурных растений, частиц металла, дерева и т.п.

При эксплуатации сепаратора в производственных условиях необходимо добиваться выделения примесей из зерновой массы не ниже следующих значений: крупных примесей - 100%, лёгких - 87%, мелких - 86%.

Лабораторный сепаратор (бурат) представляет собой конструкцию, состоящую из основания с укрепленными на нём тремя вращающимися цилиндрами, выполненными из штампованных сит с отверстиями прямоугольного сечения.

Вращение цилиндров осуществляется при помощи электропривода. Размер отверстий сортировочных сит подбирается в зависимости от характера и размеров примесей, содержащихся в зерне.

О технологической эффективности работы машины судят по степени отделения сорной примеси и содержанию нормального зерна в отходах. Расчет производится по следующей формуле:

$$E = \frac{C_1 - C_2}{C_1} \times 100\% \quad (5.1)$$

где: E - технологическая эффективность работы машины,

C_1 - содержание примесей в зерновой массе до очистки, %

C_2 - содержание примесей в зерновой массе после очистки, %.

Содержание примесей определяют по методике, изложенной в ГОСТ 30483-97.

Эффективность сепарирования в основном зависит от двух групп факторов.

Первая группа факторов обусловлена особенностями и состоянием зерновой массы; эффективность сепарирования в этом случае определяется:

- правильностью выбора физического признака для организации сепарирования и величины делящего фактора;

- степенью засорённости сырья;

- наличием примесей, которые затрудняют самосортирование зерновой массы;

- влажностью и сыпучестью зерновой массы;
- соответствием конструкции сепаратора характеру зерна и примесей.

Вторая группа факторов, обусловлена состоянием оборудования; эффективность сепарирования зависит от:

- конструктивных особенностей оборудования;
- соответствия механико-кинематических параметров оборудования физико-механическим свойствам зерновой массы;
- равномерности поступления (питания) зерновой массы в рабочую зону;
- оптимальной удельной нагрузки на рабочие органы сепаратора;
- исправности узлов и механизмов оборудования;
- эффективной аспирации оборудования.

Порядок выполнения работы

Для выполнения лабораторной работы предлагается модельная зерносмесь, состоящая из определённого количества крупных, мелких примесей и зёрен основной культуры.

Каждой бригаде студентов необходимо выделить из зерносмеси 2 навески: одну, массой 1 кг, для пропуска через сепаратор, вторую – массой 50 г для определения содержания примесей (C_1).

Зерновую смесь массой 1 кг пропустить через сепаратор. Из очищенного зерна выделить навеску массой 50 г (C_2) и разобрать её вручную на разборных досках на крупные и мелкие примеси. Полученные данные занести в таблицу 5.1.

Испытания проводят в трёх повторностях и рассчитывают средние значения, определяют также производительность машины и удельную нагрузку на 1 см ширины сита.

Сравнивая полученное значение технологической эффективности работы машины (E) с положениями технических условий, определяют соответствие эффективности очистки зерна на воздушно-ситовом сепараторе установленным требованиям. Если обнаружится, что эффективность очистки ниже установленного техническими условиями уровня, в заключении о работе необходимо сформулировать рекомендации по корректировке режима работы сепаратора (например, установить сита другого номера, изменить скорость воздушного потока и т. д.)

Обработка результатов

Кроме технологической эффективности для оценки работы зерноочистительных сепараторов приняты следующие критерии:

- производительность операции или количество зерновой смеси, поступающей в машину в единицу времени (на её часть или систему машин), Q , кг/ч или т/ч;

- удельная нагрузка на единицу ширины приёмного сита, q , кг/см сут;

- эффективность очистки зерна от примесей, E , %

Производительность сепарирующей машины определяют по данным количественного материального баланса и рассчитывают по формуле:

$$Q = \frac{G \times 60 \times 60}{t \times 1000} \quad (5.2)$$

где: Q - производительность сепаратора, т/ч;

G - количество поступившей в машину зерновой смеси, кг;

t - длительность просеивания зерна, с.

Количественный материальный баланс - это количественное равенство между массой зерновой смеси или любого другого продукта, поступивших в машину (на её часть или систему машин), и массой продуктов, полученных в результате их работы. Например, на зерноочистительный сепаратор поступило 100% зерна с примесями. В результате работы сепаратора получено 98,4% очищенного зерна, 0,3% - грубой примеси, 0,4% - крупной примеси, 0,6% - мелкой примеси и 0,3% - лёгкой примеси в виде отбросов. Наблюдаемое количественное равенство ($98,4+0,3+0,4+0,6+0,3=100\%$) свидетельствует о количественном материальном балансе.

Определение материального баланса позволяет решать большую группу задач, связанных с эффективностью ведения процессов очистки зерновых масс.

Удельную нагрузку q , или количество зерна, проходящего через единицу ширины приёмного сита сепаратора за сутки, также определяют по данным количественного материального баланса, пользуясь формулой:

$$q = \frac{G \times 60 \times 60 \times 24}{t \times B} \quad (5.3)$$

где: q - удельная нагрузка, кг/см сут;

G - количество поступившей в машину зерновой смеси, кг;

t - длительность просеивания зерна, с;

B - ширина приёмного сита сепаратора, см.

Полученные в результате расчёта значения производительности сепарирующей машины и удельной нагрузки на единицу ширины приемного сита заносят в таблицу 1.1.

Таблица 5.1 - Исходные данные и показатели работы ситового сепаратора

Количество примеси до очистки, %		C_1 , %	Количество примеси после очистки, %		C_2 , %	t , с	Q , кг/ч	q , кг/ч*см	E
крупной	мелкой		крупной	мелкой					

При полном удалении примесей из зерновой смеси ($C_2=0$) технологическая эффективность работы сепарирующей машины равняется 100 % ($E=100\%$).

Если примеси из зерновой массы не отделяются совсем ($C_1=C_2$) технологическая эффективность очистки равняется нулю ($E = 0$).

Полученные значения эффективности работы машины сравнивают с установленными технологическими нормативами и дают оценку работы машины.

2.3 Лабораторная работа № 3 (2 часа).

Тема: «Решение задач по измельчению материалов»

2.3.1 Цель работы: изучить методику расчетов основных параметров оборудования для измельчения материалов.

2.3.2 Задачи работы:

1. рассчитать при помощи изучаемых методик производительность машин, потребляемую мощность и другие параметры их работы.

2.3.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. инженерный калькулятор;
2. интерактивная доска в аудитории.

2.3.4 Описание (ход) работы:

Основные понятия и расчетные формулы

Вальцовые дробилки. Основными параметрами, характеризующими работу вальцовых дробилок, являются угол захвата α , частота вращения валков, их производительность и потребляемая ими мощность.

Для захвата кусков материала валками должно соблюдаться условие: $\alpha < 2\varphi$, где φ - коэффициент трения материала о валок, равный 0,37 - для пшеницы, ржи и ячменя; 0,33 - для бобов; и 0,28 - для проса.

Предельную частоту вращения валков n (в об/мин) определяют по формуле

$$n = 616 \sqrt{\varphi / (\rho d_n D)} \quad (1.1)$$

а предельную окружную скорость вращения валков ω (в м/с)

$$\omega = \frac{\pi D n}{60} \quad (1.2)$$

где φ - коэффициент трения;

ρ - объемная масса измельчаемого материала, кг/м³;

d - начальный диаметр измельчаемого материала, м;

D - диаметр валка, м.

Обычно $\varphi = 2,5 - 5$ м/с.

Производительность вальцовой дробилки G (в кг/ч)

$$G = 60 \pi D b \ln \rho \psi \quad (1.3)$$

где: D - диаметр валков, м;

b - ширина зазора между валками, м;

n - частота вращения валков, об/мин;

ρ - объемная масса измельченного материала кг/м³;
 ψ - коэффициент, учитывающий неравномерность питания валков,
 $\psi = 0,5 \dots 0,7$.

Если валки вращаются с различной частотой, то их производительность определяют по средней частоте вращения.

Мощность N (в кВт), потребляемая вальцовый дробилкой,

$$N = 0,117 D \ln(120 d_i + D^2) \quad (1.4)$$

Здесь D, l, d_n даны в м, n – в об/мин.

Размер поступающих на измельчение частиц должен быть в 20 - 25 раз меньше диаметра гладких валков и в 10 - 12 раз меньше диаметра рифленых валков; для дробилок с зубчатыми валками (при измельчении плодов и овощей) отношение $D/d_n = 2 \dots 5$,

Молотковая дробилка. Окружную скорость вращения молотков (в м/с) определяют по формуле

$$\omega = P \frac{\tau}{m} \quad (1.5)$$

где P - сила удара, Н;

τ - продолжительность удара с;

m - масса измельчаемого тела, кг.

Производительность молотковой дробилки (в кг/ч)

$$G = 35 D l \rho \quad (1.6)$$

где D и l - диаметр и длина ротора, м;

ρ - объемная масса измельченного материала кг/м³;

Мощность, потребляемая дробилкой N (в кВт),

$$N = 0,15 D^2 \ln \quad (1.7)$$

где n - частота вращения ротора, об/мин.

Картофелетёрочная машина. Производительность СУ (в кг/с) рассчитывается:

$$G = 8,5 \cdot 10^{-3} K D b n h^2 \rho \quad (1.8)$$

Где: K - количество пилок, размещенных на барабане;

D - диаметр барабана, м;

b - ширина барабана, м;
 n - частота вращения барабана, об/мин;
 h - высота выступающей части зубьев, м
 ρ - объемная масса измельченного картофеля, кг/м³.

Резательные машины. Основными параметрами, характеризующими работу резательных машин, являются удельное усилие резания, оптимальная скорость резания, качество получаемого продукта и состояние рабочей кромки режущего устройства.

Производительность свеклорезки G (в кг/с) определяют по формуле:

$$G = L\delta zw_p\rho K_1 K_2 \quad (1.9)$$

где L - длина режущей кромки ножа, м ($L = 0,165$);

δ - средняя толщина стружки, м, ($\delta = 1-2$ мм);

z - число ножей;

w_p - скорость резания, м/с (для центробежных резок = 6,7-9,95, для дисковых - 88);

ρ - плотность свеклы ($\rho = 1050$), кг/м³;

K_1 - коэффициент объемного уплотнения, учитывающий неравномерность распределения свеклы в рабочем объеме машины и зависящий от угловой скорости ротора ω , при $\omega = 5-20$ рад/с, $K_1 = 1,38 \cdot 10^{-5} \omega^{3,4} + 0,56$;

K_2 - конструктивный коэффициент, учитывающий степень использования ножей в резке (для центробежных резок $K_2 = 0,9$, для дисковых $K_2 = 0,85$).

Мощность потребляемая свеклорезкой, зависит от конструкции резки, количества и длины ножей, скорости резания, длины и формы стружки.

Мощность N (в кВт) для преодоления сил сопротивления резанию свеклы определяется по формуле:

$$N = 10^{-3} P_c L z r_p \omega K_3 \quad (1.10)$$

где P_c - удельная сила сопротивления резанию, Н/м;

L - длина режущей кромки одного ножа, м;

z - число ножей,

r_p - радиус резания, равный расстоянию от центра вращения ротора до вершины ножа, м;

ω - угловая скорость вращения ротора, рад/с;

K_3 - опытный коэффициент, учитывающий перекрытие части режущих кромок ножей ($K_3 = 0,8-0,9$).

Удельная сила сопротивления резанию (в Н/м)

$$P_c = 66 \omega_p^{0,2} (1 + 1,81 \omega_p^{0,36}) \quad (1.11)$$

где: ω_p - скорость резания, м/с.

2.4 Лабораторная работа № 4 (2 часа).

Тема: «Решение задач по классификации и прессованию материалов»

2.4.1 Цель работы: изучить методику расчетов основных параметров оборудования для обработки материалов давлением (прессованием).

2.4.2 Задачи работы:

1. рассчитать при помощи изучаемых методик производительность машин, потребляемую мощность и другие параметры их работы.

2.4.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. инженерный калькулятор;
2. интерактивная доска в аудитории.

2.4.4 Описание (ход) работы:

Основные понятия и расчетные формулы

Корзиночные прессы. Скорость выделения сока w_h (в м³/т), отнесенная к единице массы прессуемой виноградной мезги толщиной слоя h до 30 см, выражается зависимостью

$$w_h = \frac{1,465}{10^{(0,0332 \cdot h)}} \quad (3.1)$$

Эффективность процесса прессования прямо пропорциональна объему V (или массе) мезги, одновременно прессуемой в корзине прессы, и скорости w_h выделения сока.

Зависимости (1) соответствуют следующие оптимальные значения геометрических размеров различных прессов:

1) для вертикальных корзиночных прессов при отношении высоты H корзины к ее диаметру D равному 0,8, рекомендуют

$$V = 0,63D^3 \quad \text{и} \quad h = 0,154D; \quad (3.2)$$

2) для горизонтальных гидромеханических и поршневых прессов при диаметре корзины D и длине ее L рекомендуют

$$V = 0,785 D L \quad \text{и} \quad h = 0,25D; \quad (3.3)$$

3) для пневматических прессов, в которых около 25% объема корзины заняты резиновым баллоном, рекомендуют

$$V = 0,59D^2L \quad \text{и} \quad h = 0,187D; \quad (3.4)$$

Зависимость скорости выделения сока w_p от величины давления прессования p (в МПа) выражается формулой

$$w_p = 0,1356 + 1,21p - 0,338 p^2; \quad (3.5)$$

Зависимость давления прессования p (при $0,1 < p < 1,6$ МПа) от продолжительности процесса τ (в мин) при заданном значении w_h , рассчитывают по уравнению

$$p = 0,0112 \cdot 10^{0,1932 \tau w_h} \quad (3.6)$$

Шнековые прессы. Производительность шнекового пресса для винограда или масличных семян G (в кг/с) согласно рис. 95 приближенно можно рассчитать по формуле

$$G = 0,013 (D^2 - d^2) t n \rho (1 - K_e) \eta \quad (3.7)$$

где: D - диаметр шнека, м;

d — диаметр вала шнека, м ($d \ll 0,35D$);

t - шаг витка шнека, м (t до $0,58D$);

ρ - средняя объемная масса прессуемого материала, кг/м³;

n - частота вращения шнека, об/мин;

K_e - коэффициент, учитывающий обратное движение прессуемого материала вдоль винтового канала и через радиальный зазор между шнеком и перфорированным цилиндром (зеером): для выходной щели пресса шириной 6,5... 12 мм при прессовании хлопковых и подсолнечных семян $K_e = 0,5...0,75$; для виноградной мезги величину K_e в зависимости от частоты вращения n (в об/мин) шнека определяют по формуле

$$K_e = 0,918 - 0,046n \quad (3.8)$$

η - КПД пресса ($\eta = 0,5...0,8$ и зависит от величины зазора между шнеком и перфорированным цилиндром).

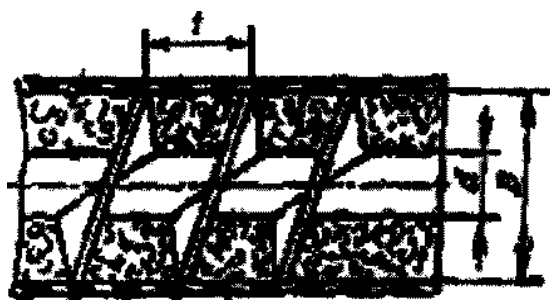


Рис. 95 Схема камеры давления шнекового пресса

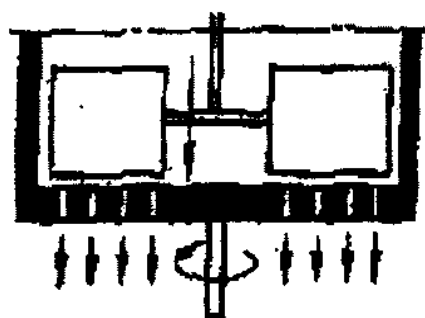


Рис. 96 Схема ротационного пресса

Для нагнетающих формовочных прессов диаметр прессовой матрицы находят из уравнения

$$G = 0,785 D f w \rho \quad (3.9)$$

где: G – производительность пресса, кг/с;

D – диаметр матрицы, м;

F – доля живого сечения отверстий от общей площади матрицы ($f = 0,04 \dots 0,08$);

w – скорость выхода массы, м/с;

ρ – плотность формуемого материала, кг/м³.

Ротационный пресс. Такой пресс, работающей по схеме (рис. 96), применяется для брикетирования сухого жома и др.

Производительность пресса G (в кг/с)

$$G = 7,5 d^2 l \rho m z \omega \quad (3.10)$$

где: d и l – диаметр и длина гранулы, м;

ρ – объемная масса гранул, кг/м³;

m – число отверстий в матрице;

z – число прессующих валков;

ω – угловая скорость матрицы, рад/с.

Пример 1.

Определить толщину слоя виноградной мезги в корзиночном прессе при относительной скорости выделения сока $w_h = 0,6$ м/т. Согласно формуле (1)

$$h = \frac{(\lg 1,465 - \lg 0,6)}{0,03321 \lg 10} = 11,68 \text{ см}$$

Пример 2.

Из формулы (9) диаметр матрицы

$$D = \sqrt{\frac{0,14}{0,785 \cdot 0,06 \cdot 0,2 \cdot 1100}} = 0,116 \text{ м}$$

Пример 3.

Из формулы (7) частота вращения шнека

$$n = \frac{0,45}{[0,013 \cdot (0,25^2 - 0,07^2) \cdot 0,15 \cdot 675 \cdot (1 - 0,65) \cdot 0,7]} = 2106 / \text{мин}$$

2.5 Лабораторная работа № 5 (2 часа).

Тема: «Определение констант отстаивания и коэффициента сопротивления среды»

2.5.1 Цель работы: изучение теории осаждения частиц шарообразной формы в жидкой среде.

2.5.2 Задачи работы:

1. Определить экспериментальным путем скорости осаждения частиц, констант основного уравнения отстаивания, а также коэффициента сопротивления среды.

2.5.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. лабораторная установка для моделирования процессов осаждения твердых частиц шарообразной формы в жидкой среде;
2. набор шариков различной плотности;
3. подсолнечное масло;
4. глицерин;
5. измерительный инструмент;
6. секундомер;
7. весы;
8. инженерный калькулятор.

2.5.4 Описание (ход) работы:

В пищевых производствах часто образуются неоднородные системы, которые необходимо разделить на фазы. Например, в результате сжигания топлива образуется дым; при дроблении сахара-рафинада на рафинадных заводах, измельчении зерна на мукомольных заводах, сушке сыпучих материалов образуются различные пыли; при мойке корнеплодов (свеклы, картофеля и т. п.) образуются грязевые суспензии. Во всех этих и других подобных процессах, необходимо отделить (очистить) дисперсную среду (газ, жидкость) от частиц дисперсной фазы (зола, частиц сахара, муки, грязи и т. п.).

Одним из методов разделения неоднородных систем является отстаивание под действием силы тяжести.

Основы теории

Силы, действующие на частицу. Если поместить частицу в жидкую или газообразную среду, то на нее будут действовать сила тяжести G , равная весу частицы, и силы гидростатического давления среды. Равнодействующая сил гидростатического давления направлена вверх и обычно называется подъемной силой A . Сила тяжести G направлена, к центру земли. Эту силу определяют по формуле

$$G = g V \rho_{\text{ч}} \quad (7.1)$$

где: V - объем частицы, м^3 ;

$\rho_{\text{ч}}$ - плотность частицы, кг/м³;

g - ускорение свободного падения, м/с².

Известно, что подъемная сила равна весу жидкости, вытесненной телом. Подъемную силу A можно вычислить по формуле:

$$A = \rho_c V g \quad (7.2)$$

где: ρ_c - плотность среды, в которой находится частица, кг/м³;

Если плотность частицы меньше плотности среды, то подъемная сила будет больше силы тяжести частицы. В этом случае равнодействующая сил направлена вверх, поэтому частица будет перемещаться вверх - всплывать. Если же плотность частицы больше плотности среды, то частица будет перемещаться вниз - осаждаться. При движении частицы возникает сила сопротивления R , со стороны среды, которая приложена к частице и направлена в сторону, противоположную движению. Величина этой силы пропорциональна скорости движения частицы и зависит от формы и размеров частицы и физических свойств среды.

Сила сопротивления R возникает в основном в результате трех причин, лобового давления среды на частицу, трения поверхности о среду, появления некоторого разрежения за частицей, что приводит к возникновению вихрей.

$$R = R_d + R_{\text{тр}} + R_p \quad (7.3)$$

где: R_d - сила динамического сопротивления (лобового давления), Н;

$R_{\text{тр}}$ - сила трения, Н;

R_p - сила сопротивления, образующаяся за счет разрежения за частицей, Н

Силу трения, и особенно силу сопротивления за счет разрежения, определить очень сложно, так как на величину этих сил влияет очень много факторов: свойства среды, форма частицы, размеры частицы, скорость движения и др. Значительно проще можно определить ее, если принять, что сила сопротивления среды равна динамической силе, умноженной на поправочный коэффициент, учитывающий влияние силы трения и вакуума за частицей. Уравнение будет иметь следующий вид:

$$R = \xi R_d \quad (7.4)$$

где ξ - коэффициент сопротивления.

Сила динамического сопротивления проявляется в результате того, что движущаяся частица вытесняет перед собой часть среды, сообщая ей энергию, при этом скорость вытесняемой среды увеличивается от некоторой начальной величины до конечной, равной скорости движения частицы.

Проследим за осаждением частицы. За некоторый промежуток времени частица пройдет путь l , вытесняя столбик среды длиной, равной пути, пройденному частицей, и сечением, равным сечению частицы. При этом скорость столбика среды увеличивается от начального значения до скорости частицы. Из механики известно, что изменение кинетической энергии равно работе действующей силы. Этот закон применим и для вытесненного столба жидкости. Уравнение будет иметь вид:

$$\frac{mV_2^2}{2} - \frac{mV_1^2}{2} = R_0 l \quad (7.5)$$

где: m - масса вытесненного столба среды, кг;

V_1 и V_2 - начальная и конечная скорости вытесненной среды, м/с;

l - путь, пройденный частицей, м;

R_0 - сила динамического сопротивления, Н

Для случая отстаивания в различных отстойниках обычно среда находится в покое или не перемещается в вертикальном направлении, следовательно, $V_1 = 0$.

Конечная скорость вытесняемой среды равна скорости осаждения частицы, тогда $V_2 = V$, где V - скорость осаждения частицы, м/с. таким образом, уравнение (5) примет вид:

$$\frac{mV^2}{2} = R_0 l \quad (7.6)$$

Массу вытесненной среды определяют по формуле

$$m = \rho_c S l \quad (7.7)$$

где: ρ_c - плотность среды, кг/м³;

S - площадь поперечного сечения столбика среды, равная площади сечения частицы, м²;

l - длина столбика среды, м.

Подставив значение массы столбика воды в уравнение (6) получим:

$$R_0 = \rho_c S \frac{V^2}{2} \quad (7.8)$$

Подставив значение динамической силы из уравнения (8) в уравнение (4), получим формулу для определения общей силы сопротивления:

$$R = \xi \rho_c S \frac{V^2}{2} \quad (7.9)$$

Для частиц шарообразной формы площадь сечения частицы определяют по формуле:

$$S = \frac{\pi d^2}{4}$$

где: d - диаметр частицы, м

Тогда формула для определения силы сопротивления среды будет иметь вид:

$$R = \xi \rho_c \frac{\pi d^2 V^2}{8} \quad (7.9a)$$

Для решения этого уравнения необходимо иметь значение коэффициента сопротивления, который находится экспериментально.

При обработке опытных данных для коэффициента сопротивления получено выражение:

$$\xi = \frac{B}{Re^z} \quad (7.10)$$

где: **Re** - критерий Рейнольдса для обтекания средой осаждающейся частицы;

B и **z** - коэффициенты определяемые из опытных данных (их значения меняются в зависимости от скорости осаждения)

Определение скорости осаждения частицы. Частица, помещенная в среду, сначала движется ускоренно, но с увеличением скорости движения возрастает сопротивление среды, что приводит к уменьшению равнодействующей силы, действующей на частицу. С некоторого момента времени равнодействующая сил станет равной нулю, и частица будет двигаться равномерно с постоянной скоростью, равной максимальной. Обычно период ускоренного движения очень небольшой, и с достаточной степенью точности можно считать, что частица осаждается с постоянной скоростью. Для этого случая можно написать уравнение равновесия сил

$$G = A + R \quad (7.11)$$

где: **G** - сила тяжести, Н;

A - подъемная сила, Н;

R - сила сопротивления, Н,

Эти силы определяют по формулам (1, 2, 9), или (9a).

Для частиц шарообразной формы:

$$G = \frac{\pi d^3}{6} \rho_q g$$

$$A = \frac{\pi d^3}{6} \rho_c g$$

$$R = \xi \rho_c \frac{\pi d^2 V^2}{8}$$

Подставив значение сил в уравнение равновесия (11) получим:

$$\frac{\pi d^3}{6} \rho_q g = \frac{\pi d^3}{6} \rho_c g + \xi \rho_c \frac{\pi d^2 V^2}{8} \quad \text{или} \quad \frac{d}{3} g (\rho_q - \rho_c) = \xi \rho_c \frac{V^2}{4}$$

Решив уравнение относительно скорости отстаивания, получим:

$$V^2 = \frac{4 (\rho_q - \rho_c) g d}{3 \xi \rho_c} \quad (7.12)$$

Приведем полученное уравнение к безразмерному виду, разделив обе части на величину V^2 . после сокращения одинаковых величин уравнение будет иметь вид:

$$1 = \frac{4 (\rho_q - \rho_c) g d}{3 \xi \rho_c V^2}$$

чтобы в правой части уравнения исключить скорость осаждения, левую и правую части уравнения умножим на величину Re^2 , тогда уравнение примет вид:

$$Re^2 = \frac{4 (\rho_q - \rho_c) g d}{3 \xi \rho_c V^2} Re^2 \quad (7.13)$$

Для случая обтекания шарообразной частицы средой, критерий Рейнольдса имеет следующее выражение:

$$Re = \frac{4 d \rho_c}{\mu_c} \quad (7.14)$$

где: V - скорость обтекания (равна скорости осаждения частицы), м/с

d – диаметр частицы, м,

μ_c – коэффициент динамической вязкости среды, Па с.

Подставив значение критерия Рейнольдса в правую часть уравнения (13), получим:

$$Re^2 = \frac{4 (\rho_q - \rho_c) g d}{3 \xi \rho_c V^2} \frac{V^2 d^2 \rho_c^2}{\mu_c^2}$$

После сокращения уравнение имеет вид:

$$Re^2 = \frac{4 (\rho_q - \rho_c) d^3 g \rho_c}{3 \xi \mu_c^2} \quad (7.15)$$

Комплекс величин $\frac{(\rho_q - \rho_c) d^3 g \rho_c}{\mu_c^2}$ представляет собой критерий Архимеда Ar ; в

него входят величины, которые не зависят от скорости, поэтому он может быть подсчитан заранее по данным о физических характеристиках среды и частицы. После подстановки критерия в уравнение (7.15) получим:

$$Re^2 = \frac{4}{3 \xi} Ar \quad (7.15a)$$

Это уравнение является критериальным уравнением для осаждающихся частиц. Его сложно решить, так как коэффициент сопротивления ξ также зависит от критерия

Рейнольдса. Подставив значение коэффициента сопротивления из уравнения (7.10) в уравнение (7.15а), получим:

$$Re^2 = \frac{4 Re^2}{3B} Ar \quad (7.15б)$$

или
$$Re^{2-z} = \frac{4}{3B} Ar \quad (7.15в)$$

Из левой и правой частей уравнения извлечем корень степени $(2 - z)$ и получим:

$$Re = \left(\frac{4}{3B} \right)^{\frac{1}{2-z}} Ar^{\frac{1}{2-z}} \quad (7.15г)$$

где ***B*** и ***z*** - константы.

Поэтому можно заменить значения

$$\left(\frac{4}{3B} \right)^{\frac{1}{2-z}} = k ; \quad \frac{1}{2-z} = m$$

где: ***k*** и ***m*** – константы.

После замены уравнение (15г) примет следующий вид:

$$Re = k Ar^m \quad (7.16)$$

Для расчета скорости осаждения необходимо решить одно из двух критериальных уравнений (7.15а) или (7.16), но для решения нужно знать значения констант *k* и *m* или коэффициента сопротивления среды ξ . Эти величины определяются экспериментально.

Описание экспериментальной установки

Схема установки показана на рис. 98. Она состоит из нескольких прозрачных отстойных цилиндров *1*, заполненных жидкостью. На цилиндрах имеются метки *2* для регистрации начала и конца отстаивания. Диаметр цилиндров выбран таким, чтобы стенки не оказывали влияния на осаждение шариков.

Для опытов применяются вязкие жидкости: подсолнечное масло, хлопковое масло, глицерин и т. д., так как при малой вязкости жидкостей сложно регистрировать время отстаивания.

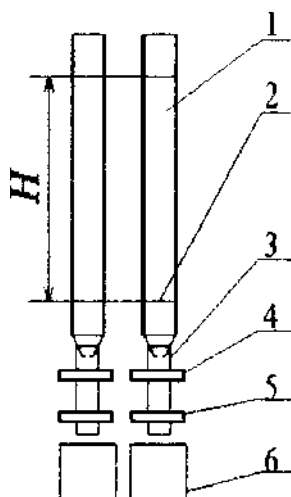


Рис. 98.Схема экспериментальной установки для проведения процесса отстаивания.

Для определения размеров шариков служит микрометр или штангенциркуль. Массу шариков определяют на аналитических весах.

Шарики опускают через верх цилиндра, и они скапливаются в нижней его части. После окончания опыта шарики выгружают через резиновый шланг 3. Для этого открывают зажим 4, чтобы шарики опустились в шланг, пережимают этим же зажимом шланг и открывают зажим 5. После этого шарики опускаются в емкость 6 вместе с частью жидкости.

Порядок выполнения работы

1. В отстойные цилиндры заливают жидкости, причем их уровень должен быть выше верхней метки.
2. Замеряют температуру жидкости. Если жидкость долгое время находилась в цилиндрах, то температуру можно считать равной температуре помещения.
3. Подбирают шарики из разного материала и разного диаметра, определяют диаметры микрометром или штангенциркулем и взвешивают шарики на аналитических весах.
4. Рассчитывают плотность материала шариков.
5. Опускают шарик в цилиндр и определяют длительность осаждения, т. е. время прохождения шарика по цилиндру от верхней метки до нижней.

Для каждого типа шарика и для каждой жидкости опыт проводят 5 - 6 раз.

Результаты замеров и расчетов заносят в протокол испытания (форма 1)

Обработка опытных данных

1. Плотность жидкостей и коэффициенты вязкости находят в приложении или справочнике для замеренной температуры.
2. Рассчитывают плотность материалов шариков по формуле

$$\rho_{\text{ш}} = \frac{m \cdot 6}{\pi d^3}$$

где: m : масса шарика, кг;

d - диаметр шарика, м.

3. Рассчитывают скорость осаждения:

$$V = \frac{H}{\tau}$$

где: H - расстояние между метками отстойного цилиндра, м;

τ - длительность осаждения, с.

№ п/п	Жидкость				Шарик			Рассто- яние между метками Н, м	Время осаж- дения τ, с.	Ско- рость осаж- дения V м/с	Ar	Re
	Наи- мено- вание	Тем- пера- тура °С	ρ _с кг/м ³	μ _с Па·с	d мм	m кг	ρ _ш кг/м ³					

4 Рассчитывают критерий Архимеда по уравнению:

$$Ar = \frac{(\rho_{\text{ш}} - \rho_{\text{с}}) d^3 g \rho_{\text{с}}}{\mu_{\text{с}}^2}$$

5. Рассчитывают критерий Рейнольдса по уравнению (7.14)

$$Re = \frac{V d \rho_{\text{с}}}{\mu_{\text{с}}}$$

6. Логарифмируют критериальное уравнение осаждения (7.16)

$$Re = k Ar^m$$

В результате логарифмирования получают

$$\lg Re = \lg k + m \lg Ar$$

7. В логарифмической системе координат строит график

$$\lg Re = f(\lg Ar).$$

Через точки проводят прямую. Пример показан на рис. 99.

8. Из графика находят величины $\lg k$ и m : $m = \operatorname{tg} \beta$; $\lg k$ – численно равен отрезку, отсекаемому прямой на оси ординат. Затем вычисляют k .

9. Определяют коэффициент сопротивления из уравнения (7.15а)

$$Re = \frac{4}{3\xi} Ar$$

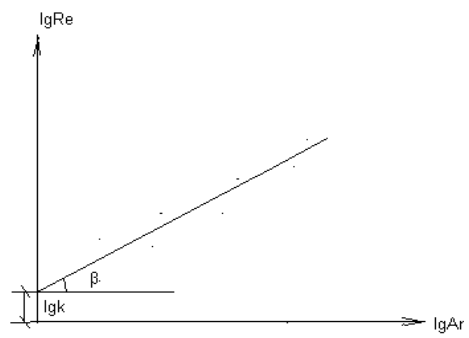


Рис.99. График зависимости $\lg Re$ от $\lg Ar$

2.6 Лабораторная работа № 6 (2 часа).

Тема: «Испытание лопастной мешалки»

2.6.1 Цель работы: изучение теории перемешивания жидких сред.

2.6.2 Задачи работы:

1. Определить экспериментальным путем расход энергии, необходимой для перемешивания при различных режимах работы мешалки.

2.6.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. лабораторная установка (мешалка) для моделирования процессов перемешивания жидких сред;
2. исследуемая жидкость;
3. ваттметр;
4. термометр;
5. инженерный калькулятор.

2.6.4 Описание (ход) работы:

Общие положения

Перемешивание и смешивание широко применяются для равномерного распределения составных частей в смесях жидких, сыпучих и пластических материалов, а также для интенсификации массообменных, тепловых и биохимических процессов.

При перемешивании значительно повышается скорость процесса в результате увеличения поверхности взаимодействующих тел и турбулизации потоков. Турбулизация потоков приводит к уменьшению толщины пограничного слоя, увеличению и непрерывному обновлению поверхности взаимодействующих фаз.

Основными показателями работы перемешивающих устройств, которые могут быть положены в основу их сравнения, являются эффективность и интенсивность перемешивания. Эффективность перемешивающего устройства характеризует качество проведения процесса перемешивания, а интенсивность определяется временем достижения заданного технологического результата. Интенсивность может выражаться частотой вращения рабочего органа мешалки при определенной длительности (времени) процесса.

Для экономичного проведения процесса перемешивания желательно, чтобы необходимый эффект перемешивания достигался за наиболее короткое время.

Широкое распространение в пищевой промышленности получили способы перемешивания в жидкой среде. Независимо от того, какая среда смешивается с жидкостью, различают следующие способы перемешивания: *механический* - с помощью мешалок различных конструкций; *пневматический* - сжатым воздухом или инертным газом; перемешивание в трубопроводах и с помощью сопел и насосов.

Механическое перемешивание осуществляется с введением в перемешивающую среду механической энергии с внешнего источника при помощи мешалок различной конструкции (лопастных, пропеллерных, турбинных и якорных). Известны, также мешалки с возвратно-поступательным движением, имеющие привод от механического или электромагнитного вибратора.

Одним из главных вопросов техники перемешивания является определению расхода энергии на вращение рабочего органа мешалки при известных размерах ее и физических свойствах жидкости,

С гидродинамической точки зрения процесс перемешивания при установившемся режиме можно рассматривать как процесс внешнего обтекания тел потоком жидкости, описываемым общим критериальным уравнением, связывающим физические характеристики движения жидкости

$$Eu = f(Re, Fr, \Gamma_1, \Gamma_2) \quad (8.1)$$

где: $Eu = \frac{\Delta p}{\rho \omega^2}$ - критерий Эйлера (мера отношения сил давления к силам инерции);

$Re = \frac{\omega d \rho}{\mu}$ - критерий Рейнольдса (мера отношения сил инерции к силам вязкости);

$Fr = \frac{\omega^2}{gd}$ - критерий Фруда (мера отношения сил инерции к силам тяжести);

Γ_1, Γ_2 - симплексы геометрического подобия;

Δp - потеря давления. Па;

ρ - плотность жидкости, кг/м³;

ω - средняя скорость движения потока, м/с;

d - определяющий линейный размер, м;

μ - коэффициент динамической вязкости, Па·с;

g - ускорение свободного падения, 9,81 м/с².

Обычно для мешалок с перемешивающими устройствами в качестве определяющего линейного размера принимают диаметр мешалки. Так как действительную линейную скорость перемешивания жидкости определить трудно, то эту величину заменяют пропорциональной ей величиной - частотой вращения мешалки, а вместо величины потери давления вводят величину потребляемой мощности. Тогда критерии гидродинамического подобия приводятся к виду:

критерии Эйлера для перемешивания $Eu_M = \frac{N}{\rho n^3 d^5} ;$

критерий Рейнольдса для перемешивания $Re_M = \frac{\rho n d^2}{\mu} ;$

критерий Фруда для перемешивания

$$Fr_M = \frac{n^2 d}{g} ;$$

где: n - частота вращения мешалки, c^{-1} ;

N - мощность на валу мешалки, Вт.

Следовательно, при условии геометрического подобия не перемешивающих устройств и сосудов обобщенная зависимость для определения мощности на валу мешалки будет иметь вид:

$$\frac{N}{\rho n^3 d^5} = C \left(\frac{\rho n d^2}{\mu} \right) \left(\frac{n^2 d}{g} \right)^n \quad (8.2)$$

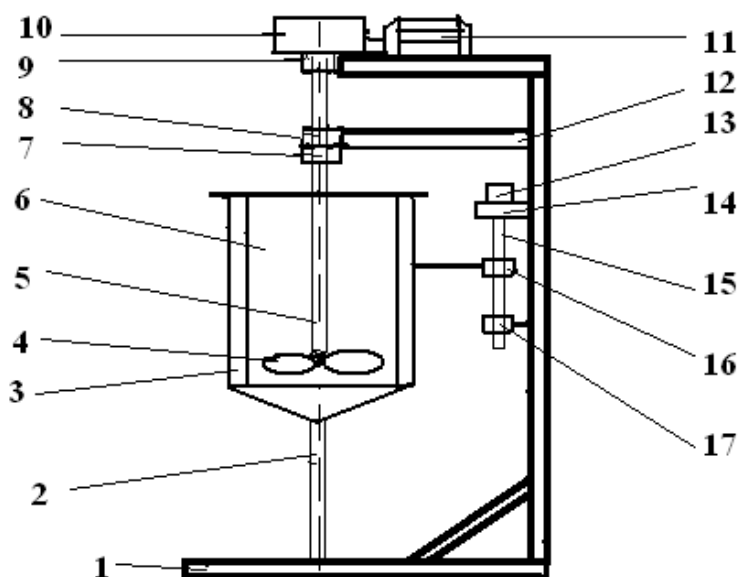
Если на поверхности однородной жидкости не образовывается воронка и рабочие органы мешалки погружены в жидкость на достаточную глубину, то гидравлическое сопротивление будет обусловлено силой трения, а влияние сил тяжести будет настолько мало, что им можно пренебречь. Тогда уравнение (2) упрощается:

$$Eu_M = C Re_M^m \quad (8.3)$$

где: C и m - константы определяемые опытным путем.

Описание экспериментальной установки

Схема установки представлена на рис. 100. Для вращения мешалки установлен электродвигатель постоянного тока *11* мощностью 0,5 кВт на кронштейне *12*. Частота вращения электродвигателя устанавливается пускорегулирующим реостатом. Редуктор *10* обеспечивает регулирование частоты вращения мешалки в пределах от 5 до 50 об/мин, которая определяется электромагнитным тахометром.



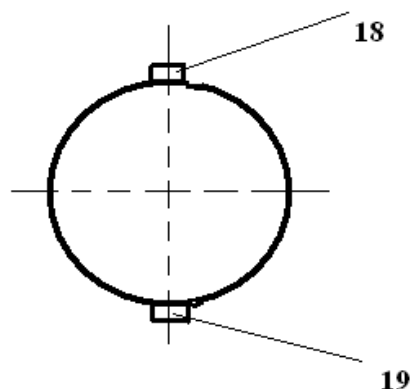


Рис.100. Схема установки для испытания лопастной мешалки

Потребляемая мощность для перемешивания жидкостей различными типами перемешивающих, устройств определяется ваттметром, включенным в электрическую схему двигателя. Действительная мощность, потребляемая мешалкой на перемешивание, находится как разность между показаниями ваттметра при работе мешалки на холостом и рабочем ходу при определенной частоте.

На станине 1 установлены стойки 18, а на корпусе мешалки - направляющие 19, которые при помощи винта 15, гайки 16; направляющих втулок 14 и 17 и маховика 15 позволяют корпусу мешалки занимать различное положение по высоте. Уровень жидкости в корпусе мешалки и высота погружения лопасти мешалки измеряются при помощи шкалы, установленной в удобном месте. Жидкость из корпуса мешалки спускается при помощи штуцера 2.

Корпус мешалки 6 на внутренней поверхности имеет контрлопасти 3. Сменные рабочие органы 4, мешалок крепятся к валу 5, соединенному с приводом промежуточным валом при помощи муфт 7 и 9. Промежуточный вал вращается в направляющем скользящем подшипнике 8.

Методика проведения испытания

Ознакомившись со способом измерения частоты вращения рабочего органа мешалки, производят замеры потребляемой мощности, на холостом ходу при заданных частотах вращения вала мешалки и заполняют форму 1.

Форма 1.

$n, \text{мин}^{-1}$					
$n, \text{с}^{-1}$					
$N_X \text{ Вт}$					
$N_P \text{ Вт}$					
$N_{\text{пол}} \text{ Вт}$					

№	Наименование показателей	Обозначение	Размерность	Величина
1	Тип мешалки			
2	Диаметр лопастей	d	$м$	
3	Диаметр сосуда	D	$м$	
4	Высота слоя жидкост	H_0	$м$	
5	Ширина лопастей	b	$м$	
6	Плотность жидкости	ρ	$Кг/м^3$	
7	Температура жидкости	t	$^{\circ}C$	
8	Коэффициент динамической вязкости	μ	$Па \cdot с$	
9	Количество контрлопастей	n	$шт$	
10	Высота контрлопастей	z	$м$	

Затем определяют потребляемую мощность при тех же частотах вращения, что и на холостом ходу, в рабочем состоянии мешалки. Для этого устанавливают и закрепляют на валу мешалки соответствующие лопасти, заполняют сосуд жидкостью, измерив ее температуру. Данные заносят в форму 1.

Рассчитывают полезную мощность, которая потребляется на перемешивание жидкости при заданной частоте вращения рабочего органа мешалки по формуле $N_{пол} = N_p - N_x$, и заполняют форму 1.

Далее заполняют форму 2.

При заполнении формы 2 используют рисунок 101 и приложения.

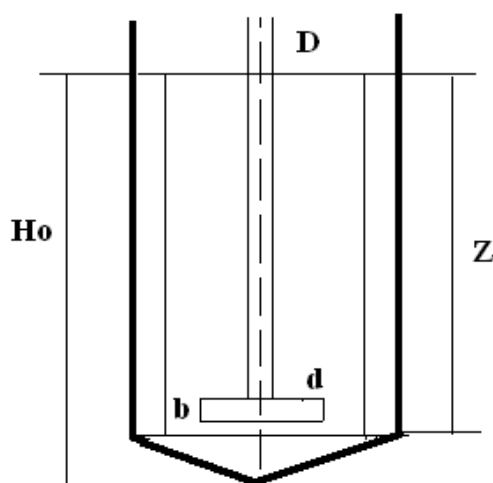


Рис.101. Основные геометрические характеристики корпуса мешалки и его рабочего органа

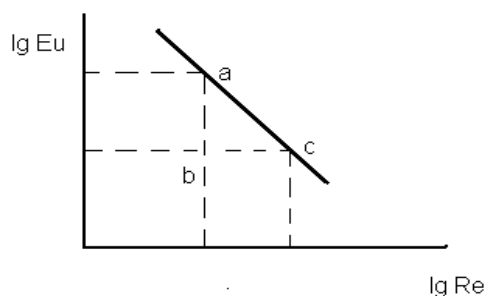


Рис. 102. График зависимости $\lg Eu_M = f(\lg Re_M)$

Обработка опытных данных

Основная функциональная зависимость между критериями для мешалки, при определенных условиях, определяется уравнением (8.3). Для определения констант C и m строят график $\lg Eu_M = f(\lg Re_M)$ (рис. 102). При этом пользуются формой 3.

Форма 3

n, c^{-1}					
Eu_M					
Re_M					
$\lg Eu_M$					
$\lg Re_M$					

$$Eu_M = \frac{N_{пол}}{\rho n^3 d^5} ;$$

$$Re_M = \frac{nd^2 \rho}{\mu_{ж}} ;$$

Логарифмируя формулу (3), получают уравнение прямой линии:

$$\lg Eu_M = \lg C + m \lg Re_M$$

Показатель степени m находят как тангенс угла наклона полученной прямой к оси абсцисс, причем на оси абсцисс откладывают значение $\lg Re_M$. Поскольку угол находится в другой четверти, то величина m будет отрицательной, рис. 3, т. е.

$$m = \operatorname{tg}(180 - \alpha) = -\operatorname{tg} \alpha = -\frac{ab}{bc}$$

Постоянная C из уравнения:

$$\lg C = \lg Eu_M - m \lg Re_M$$

Следует провести не менее трех определений и получить, из них среднее значение коэффициентов.

На основании данных, внесенных в протокол наблюдений, проводят анализ зависимости расхода энергии от частоты вращения рабочего органа мешалки.

2.7 Лабораторная работа № 7 (2 часа).

Тема: «Решение задач по гидромеханическим процессам»

2.7.1 Цель работы: изучить методику расчетов основных параметров гидромеханических процессов.

2.7.2 Задачи работы:

1.рассчитать при помощи изучаемых методик производительность, скорость разделения, эффективность и другие характеристики машин и аппаратов для разделения неоднородных систем при различных гидродинамических режимах, потребляемую мощность и другие параметры их работы.

2.7.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. инженерный калькулятор;
2. интерактивная доска в аудитории.

2.7.4 Описание (ход) работы:

Основные понятия и расчетные формулы

Режимы осаждения частиц в жидкости.

1. Ламинарный	$Re \leq 2$	$Re = \frac{1}{18} \varphi Ar$
2. Переходный	$2 \leq Re \leq 500$	$Re = 0,152(\varphi Ar)^{0,715}$
3. Турбулентный	$500 \leq Re$	$Re = 1,74(\varphi Ar)^{0,5}$

Скорость осаждения V_{oc} (в м/с) частиц шарообразной формы (уравнение Стокса) при $Re < 2$

$$V_{oc} = \frac{gd^2(\rho_{ж} - \rho_c)}{18\mu_c} \quad (6.1)$$

где: g - ускорение свободного падения, м/с² ;

d - диаметр частицы, м;

ρ - плотность частицы, кг/м³;

ρ_c ($\rho_{ж}$) - плотность среды (жидкости), кг/м³ ;

μ_c ($\mu_{ж}$) - динамическая вязкость среды (жидкости), Па·с

для частиц не шарообразной формы скорость осаждения:

$$V_{oc}' = V_{oc}\psi \quad (6.2)$$

где: ψ - коэффициент, учитывающий форму частиц (для округлых частиц $\psi = 0,77$; для

угловатых частиц $\psi = 0,66$; для продолговатых $\psi = 0,58$; для пластинчатых $\psi = 0,43$).

Скорость стесненного осаждения (отстаивания) V_{cm} (в м/с)

$$V_{cm} = 0,5V_{oc} \quad (6.3)$$

Продолжительность осаждения частиц τ (в с) в слое h (в м)

$$\tau = \frac{h}{V_{oc}} \quad (6.4)$$

Критерий Рейнольдса определяется по формуле:

$$Re = \frac{V_{oc} d \rho_c}{\mu_c} \quad (6.5)$$

Площадь отстойника находится по формуле:

$$F_o = \frac{G_\tau}{\rho_{ж} V_{cm} \tau} \left(\frac{x_o - x_c}{x_o - x_n} \right) \quad (6.6)$$

где: G_x - производительность отстойника кг/с;

x_o - концентрация частиц в осадке, мас. %;

x_n - концентрация частиц в продукте, мас. %;

x_c - концентрация частиц в суспензии (в среде), мас. %;

Эффект разделения определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_p = \frac{G_c x_c - G_n x_n}{G_c x_c} \quad (6.7)$$

где: G_n - производительность отстойника по осветленной суспензии, кг/с.

Лабораторная работа № 8 (2 часа).

Тема: «Испытание ректификационной установки»

2.8.1 Цель работы: изучение основных характеристик массообменного процесса, происходящего в ректификационной колонне периодического действия.

2.8.2 Задачи работы:

1. определение числа теоретических тарелок в колонне;
2. определение основных технико-экономических показателей работы колонны: удельного расхода тепла, воды и сравнение их с фактическим расходом.

2.8.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. лабораторная ректификационная установка;
2. термометр;
3. весы;
4. инженерный калькулятор.

2.8.4 Описание (ход) работы:

Общие положения.

Перегонка и ректификация применяются в спиртовой, винодельческой, микробиологической, витаминной и других отраслей пищевой промышленности для разделения жидких смесей на технически чистые продукты, для повышения одного из продуктов, а также для очистки продукта от примесей.

Разделение жидких бинарных смесей этими методами основывается на различной летучести компонентов смеси, что обусловлено различной упругостью их паров. Одна из составляющих этих смесей имеет большую летучесть и называется легколетучим или низкокипящим компонентом (НKK), другая -труднолетучим или высококипящим компонентом (ВKK).

Сущность процесса перегонки заключается в том, что при кипении разделяемой смеси в пар в большей мере переходит НKK. Если этот пар сконденсировать, то получают жидкость (дистиллят), обогащенную НKK. В оставшейся жидкости будет повышена концентрация ВKK.

Однако при помощи однократной перегонки не удастся достичь достаточно полного разделения компонентов.

Поэтому в промышленности чаще применяется ректификация. Это - процесс, при котором происходит одновременно многократное испарение и конденсация, т. е. это совокупность нескольких простых перегонок.

Установки для ректификации могут быть периодического и непрерывного действия.

Лучшие технико-экономические показатели имеют установки непрерывного действия. В данной работе испытание проводят на ректификационной установке периодического действия, предназначенной для получения технически чистого этилового спирта из водно-спиртовой смеси. Принципиальная схема такой установки показана на рис. 103. Она состоит из следующих основных элементов: куба-испарителя 1, ректификационной колонны 2, дефлегматора - конденсатора 3, холодильника - сборника продукта 4.

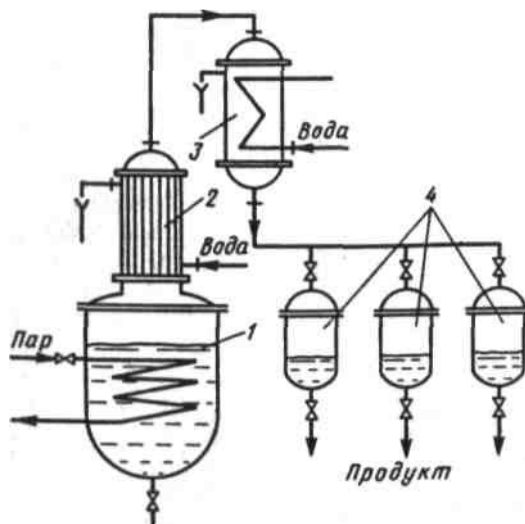


Рис.103. Принципиальная схема ректификационной установки периодического действия

В начале процесса исходную разделяемую смесь загружают в куб-испаритель, к которому подводится тепло (электронагревателями, насыщенным водяным паром и т. п.). Образующиеся пары поступают в нижнюю часть ректификационной колонны с малой концентрацией спирта, а уходят из колонны - с высокой. Над колонной расположен конденсатор-дефлегматор, в котором эти пары конденсируются.

Часть конденсата направляют в холодильник и отбирают в качестве готового продукта-дистиллята; другую часть конденсата, так называемую флегму, возвращают опять в верхнюю часть колонны и она стекает вниз.

Жидкость, которая остается в кубе после окончания процесса, обеднена НКК; она называется кубовым остатком.

Назначение ректификационной колонны заключается в том, чтобы привести в тесный контакт паровую и жидкую фазы, между которыми происходит массообмен, в результате чего пар становится богаче (укрепляется) НКК, а в жидкости повышается содержание ВКК. Поэтому колонна снабжена различными контактными устройствами (насадки, тарелки различных типов и т.д.). На поверхности контакта происходит процесс

массообмена. Движущей силой этого процесса является разность концентраций нижекипящего компонента в паровой и жидкой фазах, или разность концентраций НКК и паровой фазе ($y_P - y$), где y_P - концентрация НКК в парах, равновесных с жидкой фазой.

При расчете ректификационной колонны необходимо знать количество ступеней изменения концентрации, называемых также числом теоретических тарелок, которое требуется для увеличения концентрации НКК от начальной x_m до концентрации дистиллята.

Число теоретических тарелок можно определить графическим методом при построении кривой равновесия и рабочей линии колонны (рис. 104).

Кривую равновесия 1 строят по данным о равновесных составах паровой и жидкой фаз по НКК (приложение - табл. 1).

Рабочая линия колонны 2 характеризует зависимость между переменными по высоте колонны равновесными молярными концентрациями спирта в паре y и жидкости x для любого сечения колонны между ее тарелками.

Молярные величины используются в расчетах процесса ректификации, потому что молярные теплоты испарения различных жидкостей одинаковы, а удельные теплоты испарения, отнесенные к 1 кг вещества, заметно отличаются.

Для колонны периодического действия и для укрепляющей части колонны непрерывного действия уравнение рабочей линии имеет вид:

$$y = \frac{v}{v+1}x + \frac{x_D}{v+1} \quad (10.1)$$

где: x_D - концентрация спирта в дистилляте, % мол;

v - флегмовое число колонны (величина, показывающая, в каком отношении паровой поток, поступающий дефлегматор, разделяется на флегму и дистиллят).

Концентрацию спирта, выраженную в % об., определяют с помощью спиртомера, для перевода концентрации из % об. в % мас. можно воспользоваться данными приложения - таблица 2, перевод % мас. в % мол.

Осуществляют по зависимости:

$$x = \frac{\frac{x_a}{M_c}}{\frac{x_a}{M_c} + \frac{(100 - x_a)}{M_b}} \quad (10.2)$$

где: M_c и M_b - соответственно молекулярные массы спирта и воды; $M_c = 46,07$ кг/кмоль;

$M_b = 18,02$ кг/кмоль;

x_a - содержание НКК в смеси, % мас.

$$v = \frac{f}{D} \quad (10.3)$$

где: D и f - соответственно количество дистиллята и флегмы в колонне, кмоль, кмоль/с.

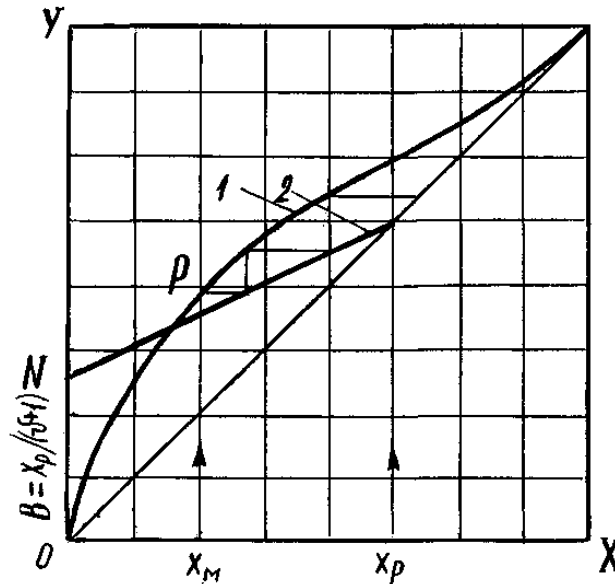


Рис. 104. Графическое определение числа теоретических тарелок в колоннах

Чтобы построить уравнение (10.1) в координатах $x - y$, необходимо определить величину отрезка $B = \frac{x_D}{v+1}$ (%/мол) и отложить его на оси $y — ON$. Вторую точку рабочей линии L получают при восстановлении перпендикуляра из точки на оси абсцисс, соответствующей x_D до диагонали диаграммы. NL - рабочая линия колонны. Затем восстанавливают перпендикуляр из точки на оси абсцисс, соответствующей x_m (концентрация начальной смеси % мол), до линии равновесия P и находят число теоретических тарелок n_T , необходимое для укрепления паров в заданном интервале концентраций от x_m до x_D как число ступеней между кривой равновесия и рабочей линией, причем построение начинают от точки P .

Очевидно, что число теоретических тарелок зависит от положения рабочей линии, т. е. от величины флегмового числа v (при заданной концентрации дистиллята x_c).

Количество тарелок в колонне определяет в свою очередь такой конструктивный размер колонны, как высота.

Следует заметить, что в установках периодического действия концентрация спирта в кубе-испарителе со временем уменьшается. Поэтому для того чтобы получать дистиллят

постоянной концентрации, необходимо постепенно увеличивать флегмовое число. С целью упрощения расчетов в данной работе флегмовое число не меняют, а концентрацию дистиллята принимают средней за весь процесс.

Зная количество реальных тарелок в тарелочной колонне n_D и число теоретических, можно определить среднее значение КПД тарелки η и тем самым оценить эффективность аппарата при работе его в разных режимах

$$\eta = \frac{n_D}{n_T} \quad (10.4)$$

Для насадочных колонн определяют высоту насадки, эквивалентную теоретической ступени концентрации, так называемую величину ВЭТС

$$ВЭТС = \frac{H_K}{n_T} \quad (10.5)$$

где: H_K - высота колонны, м.

Для проведения процесса ректификации необходимо тепло, затраты которого зависят, в частности, от величины флегмового числа. Расход тепла находят из уравнения теплового баланса: тепло приходит в установку с исходной смесью $Mc_{cm}t_{cm}$ флегмой $fc t_f$ от источника обогрева (в кубе-испарителе) Q_3 , уходит - с водно-спиртовыми парами $Gi_D = (f+D)i_D$ остатком $Rc_R t_R$ и теряется в окружающую среду Q_{nom} .

Как указывалось выше, к кубу-испарителю тепло может подводиться различными методами: от насыщенного пара, электрическим обогревом.

Для электрообогрева куба-испарителя и с учетом, что $f = vD$, можно получить уравнение теплового баланса установки:

$$Mc_{cm}t_{cm} + vDc_f t_f + Q_3 = Di_D + vDi_D + Rc_R t_R + Q_{nom} \quad (10.6)$$

где: M, D, R - соответственно количество исходной смеси, дистиллята и кубового остатка, кг,

C_{cm}, C_f, C_R - соответственно удельные теплоемкости исходной смеси, флегмы и кубового остатка, находятся по приложению (табл. 3) в зависимости от температуры и концентрации исходной смеси, флегмы и кубового остатка, кДж/(кг·К);

t_{cm}, t_f, t_R - соответственно температура исходной смеси, флегмы и кубового остатка, измеряются при испытании колонны, °С;

I_D - энтальпия паров дистиллята, находится по приложению (табл. 4) в зависимости от концентрации спирта в парах.

При проведении испытания колонны будут известны количество исходной смеси M и количество дистиллята D , а также их концентрации x_m и x_D .

Количество кубового остатка R (в кг) определяют из, уравнения материального баланса (по всему веществу):

$$R = M - D \quad (10.7)$$

Неизвестную концентрацию кубового остатка можно определить из уравнения материального баланса по НКК (спирту):

$$Rx_R = Mx_M - Dx_D \quad (10.8)$$

откуда

$$x_R = \frac{Mx_M - Dx_D}{R} \quad (10.9)$$

где: x_M, x_D - соответственно концентрация спирта в исходной смеси и дистилляте, % мас.

Из уравнения (10.6), приняв потери тепла в окружающую среду $Q_{\text{пот}} = 5\%$, определяют расход тепла:

$$Q_{\Sigma} = 1,05 [Di_D + vD(i_D - c_f t_f) + Rc_R t_R - Mc_{CM} t_{CM}] \quad (10.10)$$

Важным технико-экономическим показателем работы колонны является удельный расход тепла q_{y0} (в кДж/кг). Это расход тепла на получение 1 кг безводного спирта $D_{\text{безв}}$

$$q_{y0} = \frac{Q_{\Sigma}}{D_{\text{безв}}} = \frac{Q \cdot 100}{Dx_D} \quad (10.11)$$

Другим важным технико-экономическим показателем работы ректификационных установок является удельный расход воды. Вода необходима для отнятия тепла, выделяющегося при конденсации паров в дефлегматоре, и для охлаждения дистиллята до требуемой для хранения температуры. Расход воды также зависит от величины флегмового числа колонны.

В ректификационных установках обычно охлаждающая вода проходит последовательно через холодильник и дефлегматор.

Расход воды G_B (в кг) определяют из уравнения числового баланса:

$$G_B = \frac{Q_{\text{деф}} + Q_{\text{хол}}}{c_B(t_B^K - t_B^H)} \quad (10.12)$$

где: c_B - удельная теплоемкость воды, кДж/(кг·К), [$c_B = 4,19$ кДж/(кг·К)]

t_A^E и t_A^I - соответственно конечная (на выходе из дефлегматора) и начальная (на входе в холодильник) температура воды, измеряется при испытании установки, °С;

$Q_{\text{деф}}$ - количество тепла, выделяемое в дефлегматоре, кДж.

$$Q = vD i_D - vD c_f t_f = vD(i_D - c_f t_f) = vD r_f \quad (10.13)$$

где: r_f - теплота испарения флегмы, находится по приложению (табл. 4) в зависимости от концентрации флегмы, кДж/кг.

Остальные обозначения см. выше.

$Q_{хол}$ - количество тепла, выделяемое в холодильнике, кДж.

$$Q_{хол} = Dc_D(t_D^H - t_D^K) \quad (10.14)$$

где: c_D - удельная теплоемкость дистиллята находится по приложению (табл. 3) при средней при средней температуре дистиллята $t_D = \frac{t_D^H + t_D^K}{2}$ и известной его концентрации, кДж/(кг·К)

t_D^H и t_D^K - соответственно температура дистиллята начальная и конечная (t_D^H - можно принять равной температуре конденсации в дефлегматоре), °С.

Удельный расход воды для получения 1 кг безводного спирта (в кг/кг) находят по формуле:

$$g_B = \frac{G_B}{D_{безв}} = \frac{G_B}{Dx_D} \quad (10.15)$$

Описание экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки приведена на рис.105. Ректификационная колонна насадочного (или тарелочного) типа 5 размещена над кубом-испарителем 3, который заключен в нагревательную камеру 2, заполненную дистиллированной водой и обогреваемую электронагревательными элементами 1. Подлежащую разделению смесь заливают в куб-испаритель через воронку 4, а сливают - через вентиль 28; дистиллированную воду заливают через воронку 16, сливают через вентиль 29.

Водно-спиртовые пары из ректификационной колонны поступают в дефлегматор-конденсатор 9, где полностью конденсируются. Часть сконденсированной жидкости (дистиллят) поступает в сборник-холодильник 19, снабженный мерным стеклом 17 и вентилем 27 для ее слива. Другая часть конденсата (флегма) через подогреватель 8, оборудованный электрообогревателем 7, возвращается в верхнюю часть колонны. Расходы флегмы и дистиллята можно регулировать с помощью вентиля 12 и 13, а измерять – расходомерами 11 и 14.

Конденсация паров в дефлегматоре-конденсаторе производится водопроводной водой, которая последовательно проходит через сборник-холодильник и дефлегматор-конденсатор при открытом вентиле 25. Следует заметить, что в случае неравномерной подачи воды из водопровода целесообразно оснастить установку напорным бачком. Слив воды происходит через вентиль 22. Для измерения расхода воды служит мерник 20 (при отсутствии расходомера воды). Расход воды определяю, измеряя по секундомеру время заполнения

определенного объема мерника. Вода поступает в мерник через вентиль 21, а сливается после замера через вентиль 23.

Для измерения температуры служат ртутные термометры или термопары: исходной смеси - 15, флегмы - 6, дистиллята - 18 и 26, поступающей и нагретой воды - соответственно 24 и 10.

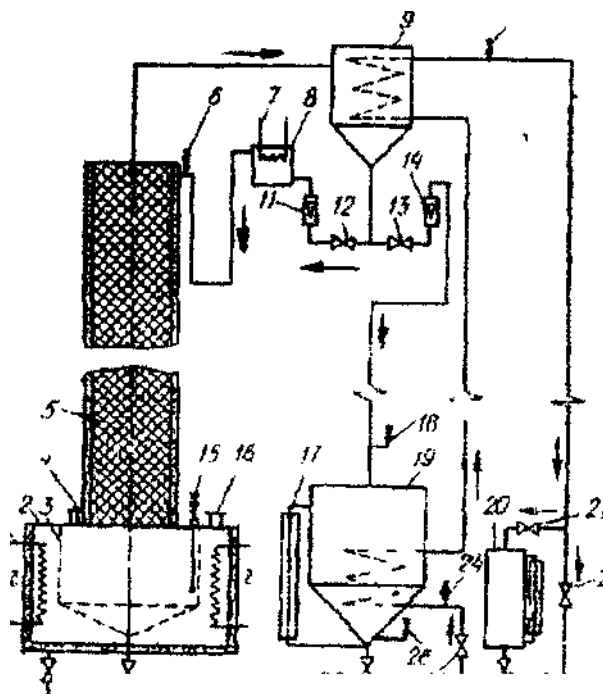


Рис.105. Схема экспериментальной ректификационной установки

Методика проведения испытания

1. В куб-испаритель установки загружают через воронку 4 исходную смесь (этиловый спирт - вода) в количестве 10 - 16 л. Предварительно замеряют концентрацию этой смеси x_w , которая должна быть в пределах 65—70%
2. Проверяют, заполнена ли нагревательная камера дистиллированной водой, если заполнена, то включают электрообогревающее устройство.
3. Подают воду в дефлегматор 9, открывая вентили 22 и 25. После появления первых капель дистиллята в сборнике-холодильнике 19 нагрузку на нагревательные элементы уменьшают и добиваются равномерного (не пульсирующего) потока дистиллята. Регулируют подачу воды к холодильнику и дефлегматору так, чтобы на выходе из дефлегматора температура воды была 40-55° С.
4. Устанавливают с помощью вентилей 13 отбор дистиллята в количестве 2,0—2,4 л/ч (по расходомеру 14) и регулируют подачу флегмы в колонну через вентиль 12 и расходомер 11, чтобы осуществить работу колонны при определенном флегмовом числе. Замечают время - начало испытания. С этого момента в течение всего испытания

замеряют через каждые 15 мин:

- количество поступающего дистиллята по мерному стеклу 17 сборника-холодильника;
- температуру кипения смеси по термометру 15;
- температуру флегмы, поступающей в колонну, по термометру 6;
- температуру поступающей в сборник-холодильник воды по термометру 24;
- температуру уходящей из дефлегматора воды по термометру 10;
- температуру дистиллята перед его поступлением в сборник-холодильник по термометру 18 и на выходе из него по термометру 26.

Испытание длится 1,5—2 ч.

Данные замеров записывают в протокол испытания (форма 1).

5. После окончания испытания выключают электрообогрев колонны. Рассчитывают средние или общие величины (по протоколу испытания). Определяют концентрацию спирта (среднюю) по спиртомеру в дистилляте.

Прекращают подачу воды на дефлегматор после того, как остынет колонна. Кубовой остаток сливают после того, как он остынет, и используют для проведения последующих испытаний.

Форма 1.

Количество исходной смеси, M , л	
Концентрация исходной смеси, x_m , % об.	
Флегмовое число, v	
Концентрация дистиллята, x_D , % об.	

Обработка опытных данных

	Показатели	Обозначения	Длительность испытания				Показатели средние или общие
			τ_0	τ_1	τ_2	τ_n	
	Температура кипящей смеси в кубе испарителя, °С						Средние
	Температура воды, поступающей в сборник-холодильник, °С						Средние

	Температура воды, уходящей из дефлегматора, °C						Средние
	Расход воды						Общие
	Количество дистиллята, л						Общие
	Температура дистиллята:						
	на входе в холодильник						Средние
	на выходе из холодильника						Средние
	Температура флегмы, °C						Средние

1. По уравнению (10.7) определяют количество кубового остатка. При этом все величины выражают в л (или м³):

$$R = M - D$$

2. Для дальнейших расчетов необходимо выразить величины M , D , R в кг, для этого находят по таблице 2 приложения В значения плотности при концентрациях соответственно x_M и x_D , тогда M (в м³) = $M\rho$ (в кг) и т. д.

3. По уравнению (10.9) рассчитывают концентрацию спирта в кубовом остатке x_R (в % об.):

$$x_R = \frac{M \cdot x_M - D \cdot x_D}{R}$$

4. Пересчитывают концентрацию исходной смеси x_M , дистиллята x_D и кубового остатка x_R из % об в % мас. по приложению В в таблице 2 и в % мол по формуле (10.2):

$$x_{\text{мол}} = \frac{x_a / M_c}{x_a / M_c + (100 - x_a) / M_B} \cdot 100$$

5. Рассчитывают с помощью формулы (10.3) количество флегмы (в м³, кг). Следует заметить, что для этого расчета не следует выражать величины D и f в кмольях, так как флегма и дистиллят имеют одинаковую концентрацию (пары в дефлегматоре полностью конденсируются) и молекулярные массы флегмы и дистиллята одинаковы:

$$f = \nu D$$

6. По справочным данным (приложение - табл. 2) строят на миллиметровой бумаге кривую равновесия $y = f(x)$ Затем на этот график наносят

рабочую линию колонны (по уравнению 10.1) Определяют число теоретических тарелок n_T . Рассчитывают величину ВЭТС по уравнению (10.5):

$$BЭТС = \frac{H_K}{n_T}$$

Если колонна тарелочная, то определяют кпд тарелок формуле (10.4).

7. По уравнению (10.8) рассчитывают расход тепла и удельный расход по уравнению (10.10):

$$Q_{\Sigma} = 1,05 [Di_D + vD(i_D - c_f t_f) + R c_R t_R - M c_{CM} t_{CM}]$$

8. По уравнению (10.12) с учетом уравнений (10.13) и (10.14) рассчитывают расход воды (в кг) и сравнивают с замеренным:

$$G_B = \frac{vDr_f + Dc_D(t_D^H - t_D^K)}{c_B(t_B^K - t_B^H)}$$

Рассчитывают удельный расход воды по уравнению (10.15).

9. Делают выводы об эксплуатационных характеристиках работы колонны.

2.9 Лабораторная работа № 9 (2 часа).

Тема: «Изучение тепловых процессов в пластинчатом теплообменнике»

2.9.1 Цель работы: изучить методику расчетов основных параметров процессов теплообмена между источником тепловой энергии и нагреваемым материалом.

2.9.2 Задачи работы:

1. рассчитать при помощи изучаемых методик потери тепла с 1 м² поверхности, температуру нагрева материалов, коэффициент теплоотдачи, общее термическое сопротивление материалов и т.д.

2.9.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. инженерный калькулятор;
2. интерактивная доска в аудитории.

2.9.4 Описание (ход) работы:

Основное уравнение теплопередачи

$$dQ = KF \Delta t_{cp} dt \quad (9.1)$$

Для установившегося движения:

$$Q = KF \Delta t_{cp} , \quad (9.2)$$

где: dQ - количество переданной теплоты, кДж;

K - коэффициент теплопередачи между средами, Вт/(м²·К);

F - площадь поверхности теплообмена, м²;

Δt_{cp} - разность температур между средами, (движущая сила процесса), °С, °К,

dx - продолжительность процесса, сек., мин, ч.

Основной закон теплопроводности, (закон Фурье)

$$dQ = -\lambda [dt/dl] F d\tau \quad (9.3)$$

Теплопроводность плоской стенки:

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} (t_{cm1} - t_{cm2}) F \tau \quad (9.4)$$

где: λ - коэффициент теплопроводности материала среды, Вт/(мК);

δ - толщина стенки (слоя), м;

В случае двухслойной стенки, например эмалированной, или многослойной:

$$Q = \sum_1^n \frac{\lambda_i}{\delta_i} (t_{cm1} - t_{cm2}) F \tau \quad (9.5)$$

где: n - количество слоев стенки.

Закон Стефана—Больцмана устанавливает зависимость между лучеиспускательной способностью тела E , количеством энергии Q , излученной телом в течение 1 ч, и площадью поверхности тела F .

$$E = \frac{Q}{F} \quad (9.6)$$

Для реальных тел:

$$E = C \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (9.7)$$

где: C - коэффициент излучения серых тел, Вт/(м²·К*)

Закон Кирхгофа:

$$\begin{aligned} E - E_0 Q/Q &= 0 \\ E &= E_0 Q_A/Q \\ E &= E_0 Q / Q_A \end{aligned} \quad (9.8)$$

где: E_0 - лучеиспускательная способность абсолютно черного тела

Основной закон теплоотдачи — закон Ньютона

$$\left. \begin{aligned} dQ &= \alpha(t_{cm} - t_f) F dt \\ dQ &= \alpha(t_f - t_{cm}) F dt \end{aligned} \right\} \quad (9.9)$$

где: α - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² К)

Удельные потери теплоты (плотность теплового потока)

$$q = K(t_{f1} - t_{f2}) \quad (9.10)$$

Количество полученной (отданной) теплоты:

$$Q = G c(t_K - t_H) \quad (9.11)$$

где: G - производительность теплового аппарата, кг/с, т/ч.

c - средняя теплоемкость жидкости (газа), Дж/(кг·К)

t_K и t_H - конечная и начальная температура жидкости (газа)

Тепловая нагрузка при конденсации насыщенного пара или испарении кипящей жидкости

$$Q = G \cdot r \quad (9.12)$$

где: r - удельная теплота конденсации (испарения), Дж/кг.

Коэффициент теплопередачи K через плоскую **или** цилиндрическую стенку при $d_{BH} > 0,5 d_H$ рассчитывают по формуле:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_1^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (9.13)$$

где: α_1, α_2 - коэффициенты теплоотдачи с одной и другой стороны стенки, Вт/(м²·К);

δ – толщина i - той стенки, м,

λ_i - теплопроводность i - той стенки, Вт/(м·К);

n - число стенок.

Величина обратная коэффициенту теплопередачи называется общим термическим сопротивлением R :

$$R = r_1 + \sum r_{cm} + r_2 R$$

$$R = \frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \quad (9.14)$$

Критерий Нуссельта, характеризующий условия на границе, можно получить методом теории подобия.

$$Nu = \alpha / \lambda \quad (9.15)$$

Критерий Фурье получают из дифференциального уравнения конвективного теплообмена:

$$Fo = \alpha \tau / l^2 \quad (9.16)$$

Критерий Фурье характеризует связь между скоростью изменения температурного поля, размерами канала, в котором происходит теплообмен, и физическими свойствами среды в нестационарных условиях.

Критерий Пекле:

$$Pe = vl / \alpha \quad (9.17)$$

где: ν - кинематическая вязкость, м²/с.

Критерий Пекле показывает соотношение между количеством теплоты, распространяемой в потоке жидкости или газа конвекцией, и теплопроводностью.

Критерий Прандтля характеризует поле теплофизических величин потока жидкости или газа:

$$Pr = c\mu / \lambda \quad (9.18)$$

Критерий Рейнольдса:

$$Re = \frac{Vd\rho}{\mu} \quad (9.19)$$

где: V - скорость потока жидкости (газа), м/с;

d - диаметр труб, м;

ρ - плотность жидкости (газа), кг/м³.

Критерий Грасгрофа:

$$Gr = \beta \frac{g l^3}{\nu} \Delta t \quad (9.20)$$

где: β - температурный коэффициент объемного расширения жидкости или газа, К⁻¹;

ν - кинематическая вязкость, м²/с;

Δt - разность температур горячих и холодных частиц;

Величину коэффициентов теплоотдачи рассчитывают по одной из следующих формул:

1. При вынужденной конвекции теплоносителя в трубе:

для ламинарного режима, $Re < 2300$

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0.8} Pr^{0.43} (Pr / Pr_{CT})^{0.25} \quad (9.21)$$

при турбулентном режиме, $Re > 10000$

$$Nu = 0,17 \cdot Re^{0.33} Pr^{0.43} Gr^{0.1} (Pr / Pr_{CT})^{0.25} \quad (9.22)$$

2. В случае, когда теплота распространяется одновременно конвекцией и лучеиспусканием в расчетное уравнение вводится общий коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_{общ} = 9,74 + 0,07 \Delta t \quad (9.23)$$

где: Δt - разность температур поверхности стенки аппарата и окружающей среды.

3. В случае пленочной конденсации пара

для пучка вертикальных труб:

$$\alpha = 2,04 \sqrt[4]{\frac{r \rho^2 \lambda^3 g}{\mu \Delta t H}} \quad (9.24)$$

для конденсации пара по горизонтальной трубе:

$$\alpha = 0,72 \sqrt[4]{\frac{r \rho^2 \lambda^3 g}{\mu \Delta t D}} \quad (9.25)$$

для конденсации пара в пучке горизонтальных труб:

$$\alpha = 0,728\varepsilon^4 \sqrt{\frac{r\rho^2\lambda^3g}{\mu\Delta tD}} \quad (9.26)$$

где: r - теплота конденсации, Дж/кг;

ρ - плотность конденсата, кг/м³;

λ - теплопроводность конденсата, Вт/(м · К);

μ - динамический коэффициент вязкости конденсата, Па·с;

$\Delta t = t_{\text{конд}} - t_{\text{ст}}$ - разность между температурой насыщенного пара и температурой стенки, °С;

H - высота вертикальной трубы или стенки, м;

D - внешний диаметр трубы, м;

ε - коэффициент зависящий от расположения труб (коридорное или шахматное расположение).

2.10 Лабораторная работа № 10 (2 часа).

Тема: «Изучение процесса экстракции»

2.10.1 Цель работы: Освоить процесс экстракции. Определить количество извлеченного вещества при однократном и многократном извлечении одним и тем же объемом растворителя.

2.10.2 Задачи работы:

1. рассчитать коэффициент распределения;
2. рассчитать количество оставшегося в бензольном растворе йода;
3. рассчитать массу йода;
4. сделать вывод об оптимальных условиях экстрагирования.

2.10.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. делительные воронки;
2. мерные цилиндры;
3. конические колбы;
4. бюретка;
5. вода дистиллированная;
6. раствор 0,01 н $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$;
7. раствор 0,05 н йода в бензоле;
8. раствор крахмала.

2.10.4 Описание (ход) работы:

1. Отмерить по 5 мл 0,05 н раствора йода в бензоле в две делительные воронки.
2. В первую добавить 45 мл, а во вторую 15 мл дистиллированной воды.
3. Интенсивно встряхивать в течение 5 мин и дать отстояться. Водные слои слить в отдельные конические колбы.
4. Во вторую делительную воронку к оставшемуся бензольному слою добавить еще 15 мл воды. Снова провести процесс экстрагирования и дать отстояться, после чего водный слой слить в ту же колбу, где уже находится водный слой после первого экстрагирования.
5. Во вторую делительную воронку добавить еще 15 мл воды и все провести еще раз. Теперь водный слой содержит смесь растворов после трех последовательных процессов экстракции.
6. Поочередно оттитровать раствором 0,01 н $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, в присутствии индикатора – крахмала оба бензольных слоя. Точку конца титрования установить по исчезновению синего окрашивания, вызванного реакцией йода с крахмалом.
7. Поочередно оттитровать раствором 0,01 н $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ оба водных слоя, в качестве индикатора также использовать раствор крахмала.

8. Результаты внести в таблицу.

№ воронки	V_1 р-ра йода в бензоле, мл	V_2 H ₂ O, мл	V р-ра Na ₂ S ₂ O ₃ , мл	
			бензольный	водный
1				
2				

9. По результатам титрования слоев из первой и второй воронок рассчитать коэффициент распределения K по уравнению:

$$K = \frac{C_1}{C_2} = \frac{V_1}{V_2}$$

где C_1 и C_2 – равновесные концентрации растворенного вещества в обеих фазах;

V_1 и V_2 – объемы раствора Na₂S₂O₃, пошедшие на титрование бензольного и водного слоев соответственно, мл.

10. По уравнению $m_n = m_o \{KV_1/(KV_1 + V_2)\}^n$ рассчитать количество оставшегося в бензольном растворе йода после однократного и трехкратного извлечения, где n – число извлечений;

m_o – масса йода в 0,05 н растворе;

V_1 и V_2 – объемы растворителей, бензольного (1) и водного (2), мл.

Масса йода (m_o) определяется, после преобразования, по формуле:

$$C_2 = \frac{m_o}{M_2 * V}$$

где M_2 – эквивалентная масса, г/моль.

Для йода в данном процессе она определяется как $M_{2,I_2} = \frac{M_{I_2}}{2}$

11. Сравнить рассчитанные и полученные Вами данные и сделать вывод об оптимальных условиях экстрагирования.