Министерство сельского хозяйства Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования
«Саратовский государственный аграрный университет
имени Н. И. Вавилова»

ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

краткий курс лекций

для студентов
направление подготовки
35.03.07 Технология производства и переработки сельскохозяйственной продукции

профиль подготовки
Технологии пищевых производств в АПК

Саратов 2018

УДК 62-93
ББК 30
С45

Процессы и аппараты пищевых производств/краткий курс лекций для студентов направления подготовки 35.03.07 Технология производства и переработки сельскохозяйственной продукции/ Сост.: Л.Ю. Скрябина, Н.Л. Моргунова // ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ». – Саратов, 2018. – 145 с.

Краткий курс лекций по дисциплине «Процессы и аппараты» составлен в соответствии с рабочей программой дисциплины и предназначен для студентов направления подготовки 35.03.07 Технология производства и переработки сельскохозяйственной продукции. Краткий курс лекций содержит теоретический материал по основным вопросам дисциплины. Курс лекций направлен на формирование у студентов профессиональных компетенций: «способен использовать в практической деятельности специализированные знания фундаментальных разделов физики, химии, биохимии, математики для освоения физических, химических, биохимических, биотехнологических, микробиологических, теплофизических процессов», «способен осуществлять управление действующими технологическими линиями (процессами) и выявлять объекты для улучшения технологии пищевых производств».

© Скрябина Л.Ю., Моргунова Н.Л. 2018
© ФГОУ ВО «Саратовский ГАУ», 2018

Введение

Главным направлением увеличения производства продуктов питания является развитие прогрессивной технологии и высокоэффективных процессов, использование которых значительно повышает производительность труда, способствует экономии исходного сырья и энергетических ресурсов, а также сокращает негативное воздействие на окружающую среду.

Как самостоятельная область знаний наука о процессах и аппаратах возникла в России. В 1897 г. в книге «Основы фабрично-заводской промышленности» Д.И. Менделеев изложил принципы построения курса процессов и аппаратов и впервые предложил классификацию процессов химической технологии.

Учение о ПАПП опирается на фундамент физики, математики, механики, теплотехники, гидравлики, материаловедения и других дисциплин. Любой технологический процесс, несмотря на различие методов, представляет собой ряд взаимосвязанных типовых технологических стадий, протекающих в аппаратуре определенного класса. Процессы пищевой технологии достаточно сложны и обычно представляют собой сочетание гидродинамических, тепловых, массообменных, биохимических и механических процессов. Курс дисциплины позволяет проанализировать и рассчитать процесс, определить оптимальные параметры, разработать и рассчитать аппаратуру для его проведения.

Краткий курс лекций предназначен для студентов направления подготовки 35.03.07 Технология производства и переработки сельскохозяйственной продукции**.**

Лекция 1.
НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ И АППАРАТОВ

1. Цель и задачи дисциплины.
2. Аппарат (машина). Требования, предъявляемые к ним.
3. Классификация машин и аппаратов пищевых производств.
4. Классификация основных процессов. Законы переноса массы и энергии.
5. Общие сведения о процессе измельчения.
6. Резание. Теория процесса резания. Классификация режущих устройств.

1. Цель и задачи дисциплины заключаются в подготовке решения следующих профессиональных задач:

– анализ проблемных производственных ситуаций, связанных с гидромеханикой, тепломассообменом в технологических средах;

– анализ состояния и динамики показателей качества работы технологического оборудования;

– интенсификация реализуемых процессов;

– разработка технологических линий, включающих гидромеханические, тепловые и массообменные устройства при производстве продуктов питания.

2. Аппарат (машина). Требования, предъявляемые к ним.

Аппарат – это устройство или приспособление без движущихся частей, что определяет машину), предназначенное для проведения того или иного процесса.

Машина – устройство, выполняющее механические движения с целью преобразования энергии или материалов. Технологические машины преобразуют форму, свойства и положение обрабатываемого материала.

Производственный процесс – это совокупность последовательных действий для достижения определенного результата.

Технология – это ряд приемов, проводимых направленно с целью получения из исходного сырья продукта с заданными ранее свойствами.

Движущая сила – физическая величина, под воздействием которой происходит протекание процесса.

Требования, предъявляемые к аппаратам (машинам).

При оценке конструкции аппарата и машины решающее значение имеет их технико-экономическая характеристика. Оптимальным является такой аппарат (машина), который обеспечивает конечный результат с наименьшими затратами.

К аппаратам (машинам) предъявляются следующие требования. Он должны быть высокоэффективными (высокопроизводительными), надежными, мало-энерго- и металлоемкими, удовлетворять требованиям безопасности работы и быть удобными в обслуживании.

Непременными условиями длительной и бесперебойной работы оборудования являются его механическая надежность и конструктивное совершенство. Механическую надежность характеризуют прочность, жесткость, устойчивость, долговечность, герметичность.

Конструктивное совершенство аппаратуры характеризуют простота, малая металлоемкость, технологичность конструкции, высокий коэффициент полезного действия.

Эксплуатационные достоинства определяются удобством обслуживания, простотой и низкими затратами на эксплуатацию.

Степень совершенства конструкции характеризуют технико-экономические показатели: производительность оборудования, расходные коэффициенты, стоимость и расходы на его эксплуатацию, себестоимость продукции. В аппаратурно-технологических линиях должны использоваться стандартные аппараты и машины. Типовая простота аппаратуры довольно проста по устройству и состоит из элементов, которые применяются и в более сложной аппаратуре.

3. Классификация машин и аппаратов пищевых производств.

Классификация оборудования может быть проведена по различным признакам. При формировании групп оборудования различных линий основным объединяющим признаком является общность функций, выполняемых в процессе переработки сырья и полуфабрикатов. По этому признаку можно выделить три группы оборудования: 1 - для подготовительных операций, 2 - для основных операций и обработки продукта и 3 - для выполнения отделочных и финишных операций.

По характеру воздействия на обрабатываемый продукт можно выделить оборудование для механической, тепловой, а также группы оборудования для ведения массообменных, химических и биологических процессов.

Оборудование для ведения механических и гидромеханических процессов.

- мойки сырья зерна, сахарной свеклы, плодов и овощей, туш животных) и тары;
- очистки и сепарирования (камнеотборники, сепараторы, просеиватели);
- инспекции, калибрования и сортирования плодов и овощей (транспортеры, калибровочные и сортировочные машины);
- очистки растительного и животного сырья от наружного покрова (щеточные машины, машины для шелушения, машины для очистки картофеля и корнеплодов, протирочные машины, машины для снятия шкур с животных и оперения с птиц;
- измельчения пищевого сырья (вальцовые станки, дробилки, мельницы, резательные машины);
- сортирования сыпучих продуктов (ситовеечные и дробильно-сортировочные машины);
- разделения жидкообразных неоднородных пищевых сред (отстойники, центрифуги, сепараторы, фильтры, прессы);
- смешивание пищевых сред (мешалки, месильные машины);
- формование пищевых сред (машины для формования штампованием, отливкой и прессованием).

Оборудование для ведения тепло - и массообменных процессов.

- повышения концентрации пищевых сред (выпарные и сусловарочные аппараты);

- темперирования сред (ошпариватели и бланшированели для фруктов и овощей, пастеризаторы и стерилизаторы);
- сушки пищевого сырья (сушильные агрегаты, СВЧ - сушилки);
- выпечки и обжарки (печи с паровым и пароводяным обогревом, жаровни, оборудование для ошпарки и опаливания, для варки и запекания);
- охлаждение и замораживание пищевых сред (охладители, желатинезаторы, камеры охлаждения и морозильные аппараты, ледогенераторы);
- ведение процессов диффузии и экстракции (экстракторы);
- ректификации.

4. Классификация технологических процессов.

На рисунке 1.1 представлена подробная схема классификации процессов по движущей силе.

Технологический процесс может быть осуществлен при различных параметрах. При этом затраты энергии, скорость процессы, а, следовательно выход продукции, затраты живого труда, материал различны. Совершенствование производства направлено на поиск таких режимов, при которых затраты были бы наименьшими, а выход – наибольшим. Такой поиск называется **оптимизацией**, а режим работы аппарата в наилучших условиях называется **оптимальным.**

Для оценки эффективности процесса на основании экспериментальных и теоретических исследований выводится критерий оптимизации, куда входят параметры, противоположно влияющие на процесс. Оптимизация при этом будет означать поиск компромисса между этими параметрами.

Каждый процесс может быть периодическим или непрерывным, рисунок 1.2. Периодические процессы производятся в аппаратах, в которые через определенные промежутки времени загружаются исходные материалы, а после их обработки в течении времени необходимого для процесса из этих аппаратов выгружают конечный продукт после разгрузки аппарат вновь загружают и процесс повторяется, т.о. периодический процесс характеризуется тем, что все его стадии протекают в одном месте но в различном промежутке времени.

Непрерывный процесс осуществляется в проточных аппаратах при этом поступление исходных продуктов, и выгрузка готового продукта происходит одновременно. Процесс характеризуется тем, что все его стадии протекают в одно время, но разобщены в пространстве.

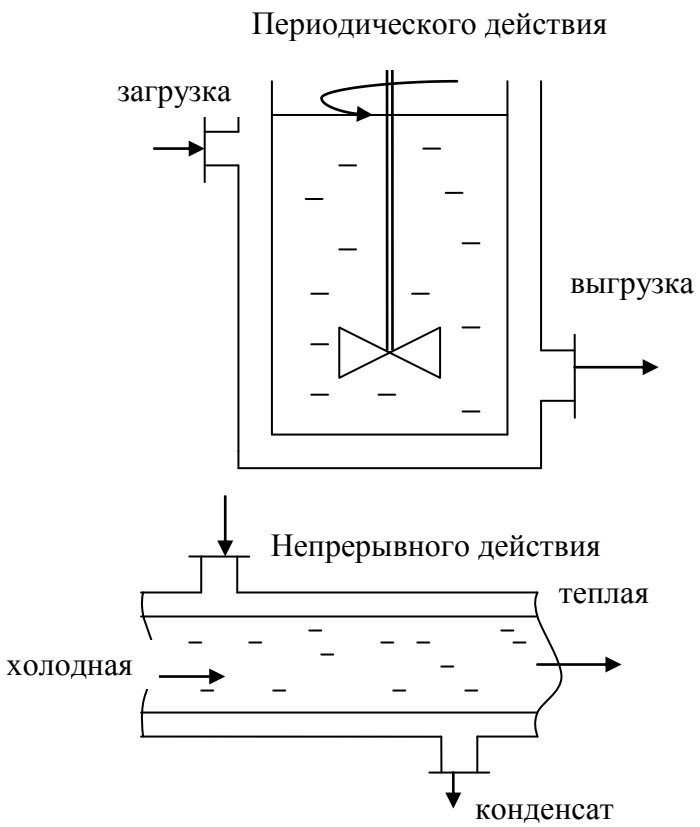


Рисунок 1.2. – Аппараты периодического и непрерывного действия.

Рисунок 1.1 – Структура технологических процессов.

Непрерывный процесс отличается от периодического по распределению времени пребывания частиц в аппарате. В периодическом аппарате все частицы находится одинаковое время, в непрерывном аппарате – это время может существенно различаться.

Для промышленных производств наиболее предпочтительны непрерывные процессы. Это и более высокая производительность соответствующих аппаратов, и снижение затрат на автоматизацию управления процессом и постоянство качественных показателей выходящей продукции. При периодической работе аппарата возникают большие потери теплоты и механической энергии. Это связано с остановкой аппарата для его загрузки, а затем с пуском его в работу и выводом на рабочий режим.

В каждом непрерывном процессе можно по-разному организовать движение взаимодействующих потоков. Можно направить потоки навстречу друг другу – противоток, можно в одном направлении – прямоток, можно организовать перекрестное движение. В большинстве случаев приемлем противоток.

Интенсивность процесса переноса зависит также от площади поверхности, через которую происходит перенос. Если взаимодействующие потоки перемешиваются друг с другом, то интенсивность тем выше, чем чаще встречаются друг с другом свежие, ранее не вступавшие в контакт. Процесс тем лучше, чет выше турбулизация потоков и скорость их движения.

Оптимизация процесса предполагает также максимальную утилизацию теплоты, поэтому покидающие аппарата потоки, имеющие высокую температуру, могут быть использованы для подогрева других потоков, участвующих в производстве.

5. Общие сведения о процессе измельчения.

Измельчением называется процесс разделения твердых (или условно твердых) тел на части под действием механических сил. Измельчение применяют в целях удобства дальнейшей обработки и хранения материала, интенсификации последующих тепло- и массообменных процессов и отделения друг от друга частей с различными свойствами (разделка).

Различают:

Измельчение	Размер, мм	
Крупное	Более 25	- куски
Среднее	25…5	- зернистые
Мелкое	5…1	материалы
Тонкое	1…0,1	
Коллоидное	Менее 0,1	- порошки

Измельчение характеризуется **степенью измельчения,** выражающей отношение средних размеров частиц до и после него:

$$\varphi_и = l_н / l_к , \qquad (2.1)$$

Эффективность измельчения повышается, если этот процесс выполнять в несколько стадий при небольших значениях $\varphi_и$.

К измельчению предъявляют общее требование – это получение измельченного материала с однородным размерным составом частиц.

Резание – это технологический процесс обработки путем разделения материала с нарушением его целостности, осуществляемый режущим инструментом с цель придания материалу заданной формы, размеров и качества поверхности. Применяют во всех отраслях пищевой промышленности.

Лезвие – это рабочая поверхность Р.О.

Крайняя часть лезвия называется режущей кромкой. Лезвие режущего инструмента характеризуется режущей способностью, которая в процессе эксплуатации лезвия уменьшается.

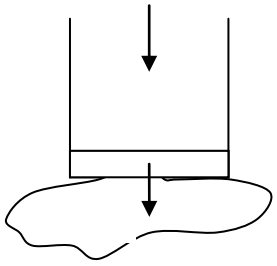
2. Материалы, подвергаемые резанию, имеют разнообразные физико-механические свойства (например хрупкая конфетная масса, упруго-пластичное мясное волокно. Они

могут быть неоднородными (рыба, мясо и т.д.), иметь в своем составе более прочные элементы по сравнению с основной массой (волокна, кости, орехи). В зависимости от реологических свойств материала выбираются способы резания, вид режущего инструмента, скорости резания и подачи продукта.

Способы резания.

Резание бывает свободным и стесненным. При свободном резании, Р.О. свободно отжимает части объекта. При стесненном резании, Р.О. находится при объемном сжатии со стороны объекта.

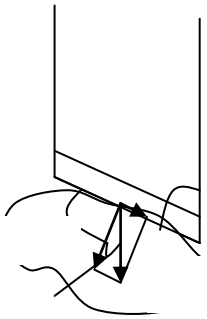
В зависимости от направления перемещения Р.О. и объекта резание бывает рубящее и скользящее при этом рубящее делится на нормальное (перпендикулярное к поверхности продукта) и наклонное.



Рассмотрим рубящее резание.

На рисунке 2.1 изображено нормальное резание, усилие F совпадает в этом направлении, при этом усилие перпендикулярно поверхности объекта, в этом случае скорость называется – нормальной скоростью объекта. $w=w_{норм}$.

Рисунок 2.1 – Нормальное резание



На рисунке 2.2 изображено наклонное резание. Здесь благодаря углу заточки Р.О. не смотря на точку что F совпадает с w при внедрении в объект происходит разложение скорости на составляющие

$W_{норм}$ – нормальная скорость, она перпендикулярна кромке.

$W_к$ – направлено по кромке.

Угол β полученный между нормальной скоростью и скоростью Р.О. называется углом скольжения – это важная характеристика процесса.

Рисунок 2.2 – Наклонное резание

$$tg\beta = \frac{w_к}{w_{норм}} = K_\beta, \qquad (2.2)$$

где β -коэффициент скольжения, т.е отношение скоростей.

Коэффициент скольжения определяет не качественные параметры процесса и затраченные усилия.

6. Теория резания. Классификация режущих устройств.

В зависимости от реологических свойств разрезаемого материала фаски оказывают различное влияние: в одном случае увеличивают усилие резания, в другом – уменьшают.

Для выбора наиболее выгодной геометрии режущей кромки необходимо знать зависимости усилий резания от толщины ножа, формы и угла заточки кромки. Помимо этого геометрия режущего инструмента оказывает существенное влияние и на чистоту разреза.

Реологические свойства обрабатывающего материала находятся в тесной зависимости с геометрией режущей кромки ножей. Так, наличие фасок напрямую зависит от элементарных реакций, возникающих при внедрении лезвия в обрабатываемый материал.

Технологическим свойством продукта в процессе резания специальными ножами является степень его податливости разделению на части под воздействием инструмента.

В начальный момент резания усилие резания возрастает. Это вызвано преодолением возникающих в продукте пластических деформаций (рисунок).

При дальнейшем погружении ножа на глубину в 0,5 h лезвия усилие растет медленнее и достигает максимального значения при погружении лезвия на 0,8 h. При этом появляется опережающая трещина, распространяющаяся по линии разрушения. В конце процесса усилие резко уменьшается.

Данная зависимость позволяет определить величину критического усилия $P_{кр}$ резания, т.е. усилия, которое необходимо приложить оператору к ножу для того, чтобы под воздействием его лезвия материал начал разделяться на части. Для его расчета необходимо знать как конструктивные параметры лезвия ножа, так и режимные параметры, а так же ряд физико-механических параметров материала.

Разделению материала на части при резании под воздействием лезвия предшествует процесс предварительного сжатия им материала до возникновения на его кромке разрушающего контактного напряжения $\sigma_р$. Момент возникновения $\sigma_р$ определяется значением усилия $P_{кр}$, прикладываемого к ножу и преодолевающего ряд сопротивлений различного происхождения, возникающих в продукте.

Классификация режущих устройств осуществляется следующим образом:

- по назначению: для резания хрупких, твердообразных, упруго-вязко-пластичных и неоднородных материалов;
- по пинципу действия: периодического, непрерывного и комбинированного;
- по характеру движения режущего р.о.: с вращательным, плоско-поступательным, плоскопараллельным, поворотным, вибрационным;
- по конструкции привода: электромеханический, гидравлический, пневматический;
- по виду режущего р.о.: пластинчатые, дисковые, струнные, гильотинные, роторные, струйные, ультразвуковые, лазерные;

классификация режущих рабочих органов делится на:

- по геометрии р.о.: клин, пластина, диск, цилиндр, конус, струна, спираль, лента, нож и тд.;
- по форме лезвия: гладкая при этом заточенная и не заточенная, зубчатая, фигурная и т.д;
- по форме режущей кромке: прямолинейная, криволинейная, выполненная в окружности и тд;
- по характеру заточки, рисунок 2.3: односторонняя, двухсторонняя, многосторонняя, без заточки;

Для резания хрупких материалов применяют дисковые ножи (с зубьями и гладкой кромкой). Для упруго-вязко-пластичных (масло) применяют струны. Для резания пластичных материалов - пластинчатые ножи (или как их разновидность призматические, применяемые в мясорубках). Также применяют серповидные ножи. Для разделки применяют обвалочные ножи и т.д.

Т.О. При выборе режущего инструмента следует учитывать физико-механические свойства материала.

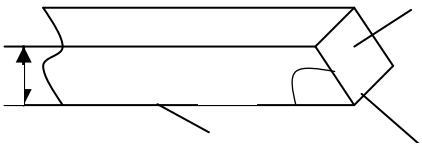


Рисунок 2.3а. - дносторонний клин:
1 – режущая кромка, 2 – рабочая поверхность, 3 –

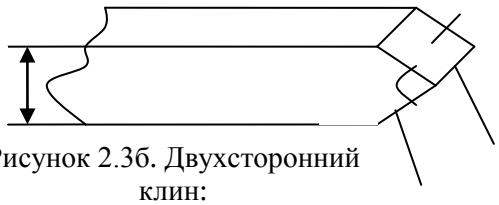


Рисунок 2.3б. Двухсторонний клин:
α – угол заострения заточки Р.О. ,
1 – режущая кромка, 2 – рабочая

Вопросы для самоконтроля

1. Классификация процессов по движущей силе.
2. Что такое оптимизация?
3. Что такое вязкость?
4. Единицы измерения кинематического и динамического коэффициента вязкости.
5. Что такое аппарат?
6. Что такое машина?
7. Что такое производственный процесс?
8. Какие виды плотности вы знаете?
9. Какие виды классификации пищевого оборудования вы знаете? Приведите примеры.
10. Перечислите основные физические свойства пищевых жидкостей.
11. Что такое измельчение?
12. Что такое резание?
13. Какие виды резания вы знаете?
14. В чем заключается теория процесса резания?
15. Как классифицируются режущие устройства?
16. Как классифицируются режущие рабочие органы?
17. Что такое степень измельчения?

Список литературы

Основная

1. Машины и аппараты пищевых производств: в 3 кн. Кн. 1/ред. В.А. Панфилов. - М.: КолосС, 2009. - 610 с.- ISBN 978-5-9532-0509-2
2. Машины и аппараты пищевых производств: в 3 кн. Кн. 3/ред. В.А. Панфилов. - 2-е изд., доп. и перераб. - М.: КолосС, 2009. - 551 с. ISBN 978-5-9532-0754-6
3. Процессы и аппараты пищевых производств: учебник для вузов. В 2-х кн. Кн. 1 / А.Н. Остриков, Ю.В. Красовичкий, А.А. Шевцов; ред. А.Н. Остриков. - СПб.: ГИОРД, 2007. - 704 с. ISBN 978-5-98879-041-9
4. Процессы и аппараты пищевых производств: учебник / Ю.М. Плаксин, Н.Н. Малахов, В.А. Ларин. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: КолосС, 2007. - 760 с. ISBN 978-5-9532-0581-8

Дополнительная

1. Процессы и аппараты пищевой технологии: учебник/Г.Д. Кавецкий, Б.В. Васильев. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Колос, 2000. - 551 с.
2. Процессы и аппараты пищевых производств: учебник / В.И. Горбатюк. - М.: Колос, 1999. - 330 с.

Лекция 2

МЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ. ПРОЦЕСС ДРОБЛЕНИЯ

1. Классификация способов дробления.
2. Устройство и работа основных типов дробилок. Их достоинства и недостатки.

1. Классификация способов дробления

Измельчение, при котором разрушение твердых тел происходит по произвольным поверхностям, называется дроблением. В результате дробления получают продукты, состоящие из частиц разной величины и формы.

Одним из основных показателей дробильных машин, так же как и в процессе резания, являются степень измельчения φ, т.е. отношение - средневзвешенный размер куска исходного материала, - средневзвешенный кусок конечного (готового) продукта.

Степень измельчения зависит от конструкции дробильной машины, физико-механических свойств перерабатываемой каменной породы и абсолютной величины кусков. С увеличением степени измельчения производительность дробильных машин снижается, а расход энергии возрастает. Каждой конструкции дробильной машины при максимальной производительности соответствует оптимальная степень измельчения: так, для щековых и конусных дробилок крупного дробления i=3-5. Когда требуется большая степень измельчения, дробление осуществляют в несколько стадий, т.е. последовательно устанавливают ряд дробильных машин, различных по конструкции и техническим характеристикам.

При этом постепенно переходят от крупного к среднему и затем мелкому дроблению с таким расчетом, чтобы эффективность дробления на последующих стадиях была выше, а затраты энергии меньше.

Процесс дробления отличается большим расходом энергии и быстрым износом деталей машин, находящихся в соприкосновении с дробимым материалом. Такие детали изготовляют большей частью из дорогих легированных сталей.

Перед дроблением из исходного материала следует удалять фракции готового продукта, так как, распределяясь между более крупными кусками, они повышают упругость измельчаемой массы. При переработке нерудных строительных материалов машины могут работать по открытому и замкнутому циклам.

При дроблении по открытому циклу материал проходит через дробильную машину только один раз, при этом куски конечного продукта получаются неодинаковыми по величине.

При дроблении по замкнутому циклу крупные фракции оставшегося на сите материала после сортировки возвращаются на повторное дробление. Так как материал неоднократно проходит через дробильную машину, то нагрузка (циркуляционная) на нее увеличивается, однако машина работает с большей производительностью, чем при открытом цикле, и выдает более равномерный продукт. При замкнутом цикле дробления материал не переизмельчается и уменьшаются расходы энергии, а также износ рабочих органов машины.

Основными способами дробления, осуществляемыми рабочими органами дробильных машин, являются раздавливание (сжатие), удар, истирание и раскалывание. Часто эти способы сочетают друг с другом, например раздавливание с ударом, удар с истиранием и т.п., при этом комбинируются действия сил изгибающих, срезающих и разрывающих.

Выбор способа дробления зависит от физико-механических свойств материала (твердости, хрупкости, вязкости, загрязненности глиной, склонности к замазыванию дробильной камеры), начальной величины кусков и требуемой степени измельчения. Твердые материалы наиболее эффективно измельчаются ударом или раздавливанием,

пластинчатые (глина) - раздавливанием в сочетании с истиранием, хрупкие материалы (уголь) - раскалыванием.

Существуют различные способы дробления, рисунок 3.1

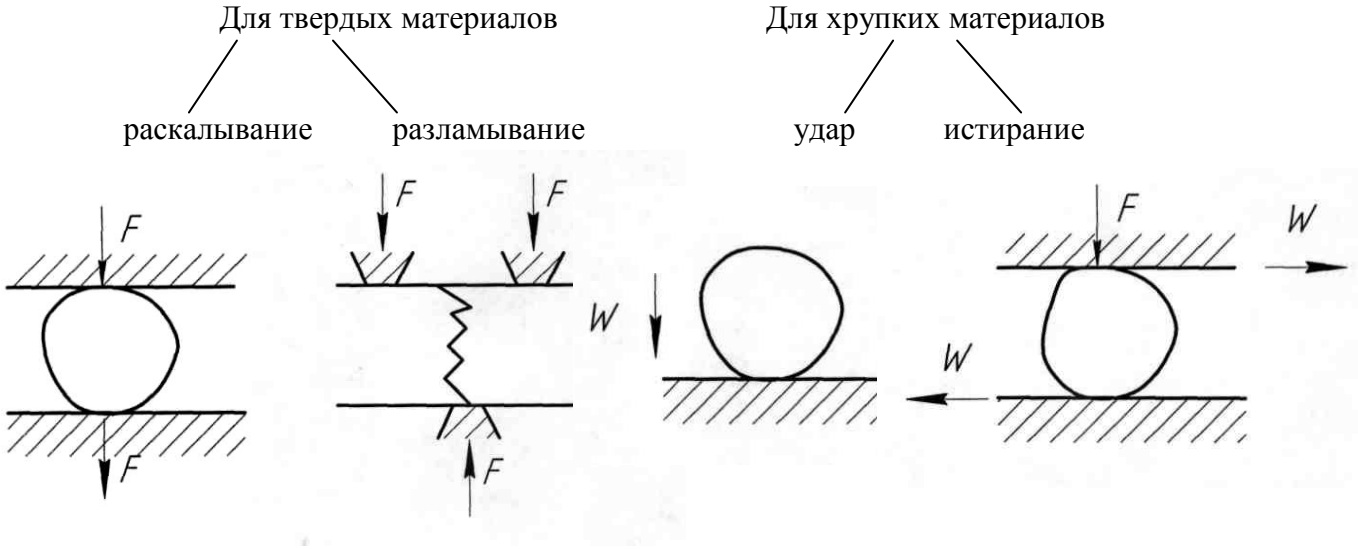


Рисунок 2.1 – Способы дробления

Для дробления твёрдых материалов используют дробильные машины.. Различают дробилки крупного (до 100-300 *мм*), среднего (25-100 *мм*) и мелкого (5-25 *мм*) дробления. По форме дробящего органа дробилки подразделяют на 5 классов.

2. Устройство и работа основных типов дробилок. Их достоинства и недостатки.

В зависимости от заданных условии: производительности, экономичности, качественных особенностей продукта, получаемого на выходе - используются разные виды дробилок (мельниц). В зависимости от модификации эти дробилки могут найти применение в следующих областях: дробление зернистых продуктов, измельчение косей в производстве кормов, каменных солей в химической и пищевой промышленности. Мельницы применяют для мелкого тонкого дробления, а именно для дробления зерна, солода, жмыха, сухарей, бобов и т.д.

Основные машины подразделяются на следующие типы: щековые дробилки, гирационные (конусные) дробилки, молотковые дробилки, протирочные машины, валковые и шаровые мельницы.

Ко всем дробильным машинам предъявляются общие требования: удаление измельченного материала из рабочего пространства, сведение к минимуму пылеобразования, непрерывная и автоматическая разгрузка, возможность регулирования степени измельчения, равномерность частей измельченного материала, небольшой расход энергии на единицу продукции.

Щековые дробилки

Щёковые дробилки, рисунок 3.2, созданы в США в 1858. В щёковых дробилках материал дробится раздавливанием, изгибом, иногда истиранием. Щековые дробилки относятся к оборудованию лабораторного класса, имеют небольшие габаритные размеры и вес. Они предназначены для дробления хрупких, сыпучих материалов различной прочности и твердости. Это машины среднего и мелкого дробления (максимальный размер кусков исходного материала для ЩД 6 - 50 мм, для ЩД 10 - 70 мм, минимальный размер материала после измельчения - 2-3 мм).

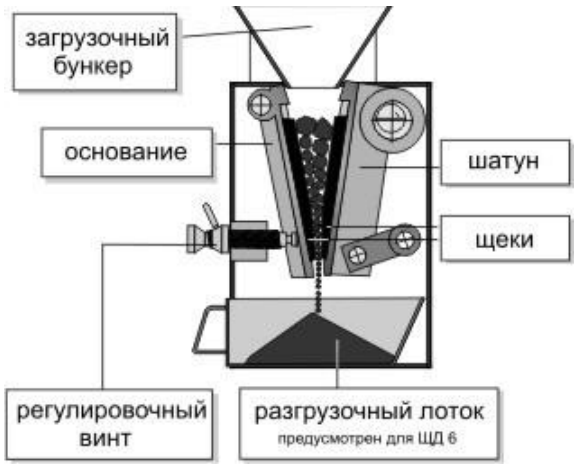


Рисунок 2.2 – Щековая дробилка

- Крупность дробленного материала определяется зазором между щеками в нижней части (выходной щелью) и склонностью материала к самоизмельчению.
- Во избежание поломки щековой дробилки при попадании недробимых предметов предусмотрено предохранительное устройство в виде срезного штифта.
- Замена рабочих поверхностей производится без применения специального инструмента.

В состав дробилки входят: загрузочный бункер, сварной корпус, основание, шатун, разгрузочный лоток (для ЩД 6) и электродвигатель.

Внутри корпуса расположены две щеки: неподвижная закреплена на основании, подвижная - на шатуне. Верхняя часть основания подвешена на оси, а положение нижней части устанавливается регулировочным винтом. Винт упирается в нижнюю часть основания через упор со срезным штифтом, который предохраняет дробилку от поломки при попадании в рабочую зону недробимого тела.

Положение нижней части основания определяет расстояние между шатуном и основанием, называемое разгрузочной щелью. Верхняя часть шатуна смонтирована на эксцентриковом валу, связанном с электродвигателем через клиноременную передачу. Нижняя часть шатуна соединена с корпусом шарнирно через рычаг.

Материал подается в загрузочный бункер, откуда поступает в рабочее пространство между дробящими щеками. При вращении эксцентрикового вала подвижная щека перемещается относительно неподвижной, обеспечивая дробление и разгрузку материала.

При сближении щек материал измельчается, при отходе подвижной щеки - перемещается в дробилке и разгружается. Изменение крупности частиц дробленого материала производится регулировкой разгрузочной щели.

В дробилку могут быть помещены только куски материала размером, не превышающим максимальный размер, установленный в сопроводительной технической документации.

Производительность щековых дробилок зависит от физических свойств измельчаемого материала, его размеров на входе и требуемой крупности на выходе (ширины разгрузочной щели).

Дробление твердых абразивных материалов рекомендуется в две стадии: первая - с большим зазором между щеками, вторая - с меньшим зазором. Рекомендуется дробление материала с минимальным процентом влажности.

При дроблении влажного материала происходит его налипание на щеки, что приводит к снижению производительности и прекращению дробления. Заклинивание сухого материала в нижней части зоны дробления исключено вследствии наличия значительных сдвиговых усилий. При возникновении в этой зоне напряжений,

превышающих допустимые нагрузки (попадание недробимого тела), упор срезает штифт, основание откланяется и недробимое тело выходит из зоны дробления.

Запрещено:

- дробление пластичных материалов, т.к. оно сопровождается налипанием материала на щеки, что приводит к снижению производительности и прекращению дробления;
- дробление "под завалом", т. к. это может вызвать выброс материала из дробилки;
- дробление радиоактивных и взрывоопасных материалов.

Достоинства щёковых дробилок

1. Надежность.
2. Длительный срок службы, благодаря:
3. Эффективность работы, обеспеченная:
4. Возможность установки дробилки на любую ровную поверхность без дополнительного крепления.
5. Соответствие государственным санитарно-эпидемиологическим правилам и нормативам по шуму и вибрации.
6. Небольшие габариты и вес.
7. Высокая степень защиты от повреждений и коррозии, благодаря:

Конусная дробилка

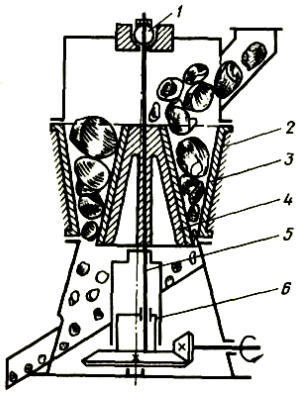


Рисунок 2.3 – конусная (гирационная дробилка)
1, цилиндрический корпус 2, броневая плита 3, внутренний цилиндр 4, вертикальный вал 5, эксцентрик 6.

В конусных дробилках, рисунок 2.3, регулировка гранулометрического состава происходит за счет изменения зазора между мелющими конусами, подбора амплитуды колебаний дробящего конуса, выбора частоты вращения ведущего дебаланса.

- Проведение дробления в сухом и мокром режимах.
- Эффективное измельчение при одновременных деформациях сжатия и сдвига в частицах материала.
- Регулировка гранулометрического состава за счет:
  - изменения зазора между мелющими конусами;
  - подбора амплитуды колебаний дробящего конуса;
  - выбора частоты вращения ведущего дебаланса.
- Возможность работы "под завалом", без дозировки дробимого материала.
- Комплектация пультом управления.

Корпус представляет собой два соосно установленных цилиндра - наружный и внутренний. В полости, образованной внутренним цилиндром и опорой, расположены ведущий и ведомый дебалансы.

Чаша ввинчивается в резьбу наружного цилиндра корпуса. С чашей стопорными винтами соединена упорная крышка, за счет вращения которой изменяется расстояние

между чашей и дробящим конусом, тем самым задаётся крупность конечного продукта (устанавливается опытным путем). Фиксация выбранного зазора осуществляется путем ввинчивания стопорных винтов, в результате чего крышка упирается в корпус, удерживая чашу от поворота.

Дробимый материал загружается в чашу, откуда поступает в дробящую полость, образованную поверхностями футеровок конуса и чаши. Частицы материала заклиниваются между футеровками и подвергаются одновременно деформациям сжатия и сдвига.

Производительность конусных дробилок зависит от физических свойств измельчаемого материала, его размеров на входе и требуемой крупности на выходе.

Дробилки устанавливают в сухом отапливаемом и вентилируемом помещении, предварительно обеспечив горизонтальность площадки. Дополнительное крепление не требуется. Установка дробилки должна обеспечивать сбор измельченного материала в приемную емкость.

Достоинства конусных дробилок ВКМД 6

Высокое качество изделия.

1. Надежность.
2. Длительный срок службы. Эффективность работы, обеспечивается:
   - высокой степенью дробления;
   - одновременной деформацией сжатия и сдвига в частицах материала;
   - возможностью работы "под завалом", без дозировки дробимого материала.
3. Возможность установки дробилки на любую ровную, жесткую поверхность без дополнительного крепления, благодаря практически полному отсутствию воздействия вибрационных нагрузок на опоры.
4. Возможность регулировки гранулометрического состава за счет:
   - изменения зазора между мелющими конусами;
   - выбора частоты вращения ведущего дебаланса.
5. Универсальность. Проведение дробления в "сухом" и "мокром" режимах.
6. Низкий уровень шума
7. Высокая степень защиты от повреждений и коррозии, благодаря полимерному покрытию наружных поверхностей изделия.

Молотковые дробилки

Молотковая дробилка, рисунок 2.4, относится к оборудованию лабораторного класса. Она предназначена для дробления волокнистых, а так же малоабразивных материалов. Это дробилка среднего и мелкого дробления: размер кусков исходного материала - 20 мм, размер материала после измельчения - 0,5-10 мм.

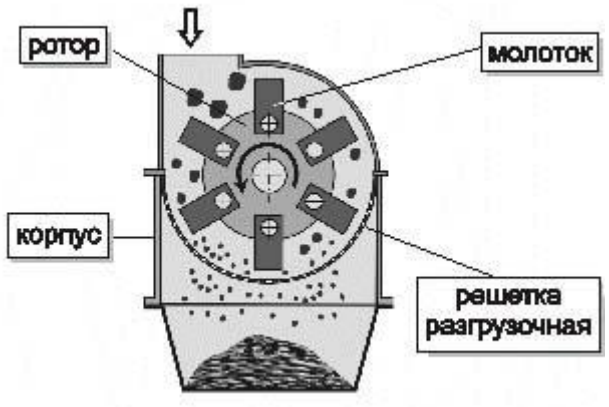


Рисунок 2.4 – Молотковая дробилка

Дробилка молотковая МД 2х2 может применяться при переработке отходов строительных материалов, глины, соли, кирпичной крошки, минералов, стекла, огнеупоров, шлаков, растительных материалов, отработанных формовочных смесей, отходов электроники и многих других материалов. Получение необходимого гранулометрического состава происходит за счет подбора разгрузочной решётки, количества молотков и их формы, а также изменения частоты вращения ротора.

Основными составными частями дробилки являются: разъемный корпус, состоящий из основания и крышки, смонтированный в корпусе ротор, электродвигатель, загрузочный бункер, опора в составе стойки и основания с четырьмя резиновыми амортизаторами.

Камера дробления образована внутренней поверхностью крышки, частью основания и разгрузочной решеткой. Крышка защищена от износа футеровочными пластинами: изогнутой (гладкой или зубчатой) и плоской. Герметичность прилегания крышки к основанию обеспечивается уплотнением. Решетка устанавливается на двух направляющих, приваренных к боковым стенкам основания, и крепится четырьмя болтами.

Решетка изготавливается в одном из трех вариантов:

- сплошная со сверленными или фрезерованными отверстиями;
- двухслойная, верхний слой которой представляет собой перфорированный лист, а нижний - подложку из более толстого листа с окнами;
- решетка с сеткой, расположенной между двумя листами.

Внутри камеры дробления смонтирован ротор. Он представляет собой вал, на котором установлены два диска. В отверстия, выполненные по периферии дисков, вставлены шесть осей, на которых шарнирно подвешены молотки. Молотки представляют собой заточенные или плоские металлические пластины, выполненные из закаленной стали. Молотки разделены дистанционными втулками. Ряды молотков на соседних осях смещены друг относительно друга с перекрытием. На фланце верхней части крышки установлен загрузочный бункер. Внутри загрузочного бункера закреплена шторка, состоящая из полосок резины с металлическими пластинами на концах. Ниже шторки расположены два отбойника. Шторка и отбойники предназначены для предотвращения выброса материала из загрузочного бункера в процессе дробления.

Для работы совместно с блоком пылеулавливания БПУ в боковой стенке предусмотрено окно. Подключение блока пылеулавливания осуществляется через переходник.

Принцип действия. Дробилка является изделием непрерывного действия, т.е. ее производительность определяется количеством материала, выходящего через разгрузочную решетку за единицу времени. Двигатель дробилки вращает через ременную передачу ротор. При вращении возникает центробежная сила, под воздействием которой молотки располагаются радиально относительно оси ротора.

Дробимый материал через загрузочный бункер непрерывно подается в камеру дробления, где разрушается под действием ударов молотков, ударов и трения о внутренние поверхности камеры дробления, а также самоизмельчается. Измельченный материал проходит через отверстия разгрузочной решетки, размер которых определяет крупность продукта.

При работе с блоком пылеулавливания пылевидная фракция дробленого материала захватывается воздушным потоком, создаваемым вентилятором БПУ, проходит через воздуховод и осаждается в циклоне и рукавном фильтре.

Производительность дробилки при измельчении различных материалов зависит от ряда факторов, в том числе от количества и формы молотков, частоты вращения двигателя, размеров отверстий решетки и др. При дроблении растительных и подобных им материалов применяются заточенные молотки и двигатель с высокой частотой вращения; при дроблении хрупких материалов более эффективны плоские молотки.

Дробилки устанавливают в сухом отапливаемом и вентилируемом помещении, предварительно обеспечив горизонтальность площадки. Дополнительное крепление не требуется. При установке дробилки необходимо обеспечивать сбор измельченного материала в приемную емкость.

Достоинства дробилки молотковой.

1. Высокое качество изделия.
2. Надежность.
3. Удобство управления и соблюдение требований техники безопасности обеспечивается пультом управления.
4. Возможность установки дробилки на любую ровную, твердую поверхность без дополнительного крепления, благодаря практически полному отсутствию воздействия вибрационных нагрузок на опоры.
5. Возможность получения необходимого гранулометрического состава за счет:
   - подбора размера и формы отверстий разгрузочных решёток;
   - подбора скорости вращения ротора;
   - подбора количества и формы молотков.
6. Исключение выбросов пылевой фракции в процессе работы дробилки, при подключении блока пылеулавливания БПУ.
7. Высокая степень защиты от повреждений и коррозии, благодаря полимерному покрытию наружных поверхностей изделия.

Валковые дробилки (мельницы)

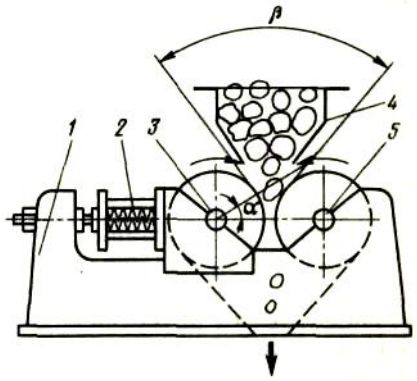


Рисунок 2.5 – Валковая дробилка

В валковые дробилки, рисунок 2.5, материал затягивается силами трения и раздавливается между двумя параллельными цилиндрическими валками, вращающимися навстречу друг другу. Валки затягивают кусок материала, если диаметр валка приблизительно в 20 раз больше размера куска. Угол захвата α обычно составляет 18^0.

Валковые Д. появились в Англии в 1806. Поверхность валков может быть гладкой, зубчатой и рифленой. Для хрупких и мягких материалов (например, уголь, соль) применяют зубчатые валковые Д. Они захватывают куски, которые только в 1,5-4 раза меньше диаметра валка. Дробилка может иметь один валок, вращающийся вокруг горизонтальной оси параллельно неподвижной рабочей щеке.

Основная область применения. Валковые дробилки могут применяться в пищевой промышленности, для дробления и помола зерна, жмыха, соли и т.д. Они предназначены для среднего, мелкого и тонкого измельчения.

Валковая дробилка состоит из станины 1, загрузочного бункера 4. Подшипники валка 5 неподвижны, а валка 3 подвижны и удерживаются при помощи пружины 2, что позволяет валку 3 смещаться при попадании в мельницу твердых инородных тел. Размер

кусков продукта определяется шириной щели между валками. Загрузка производится непосредственно из бункера.

Дробимый материал загружается в чашу, откуда при вращении валков навстречу друг другу захватывается и раздавливается, причем оба вальца дробилки могут иметь одинаковую частоту вращения, тогда усиливается эффект раздавливания. Или один из вальцов вращается с меньшей частотой, чем другой, тогда усиливается эффект истирания.

Дробилки устанавливают в сухом отапливаемом и вентилируемом помещении, предварительно обеспечив горизонтальность площадки. Дополнительного крепления не требуется. Установка дробилки должна обеспечивать сбор измельченного материала в приемную емкость.

Достоинства дробилок (мельниц)

- в результате их применения продукт дробления получается требуемой крупности за одну стадию;
- в дробилке существует возможность подбора наиболее эффективных режимов дробления;
- в дробилке есть возможность настройки на производство любой фракции;
- дает минимальный расход электроэнергии и низкие эксплуатационные затраты;
- малая площадь установки без использования фундамента.
- автоматизированная система управления;

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое измельчение?
2. Что такое резание?
3. Какие виды резания вы знаете?
4. В чем заключается теория процесса резания?
5. Как классифицируются режущие устройства?
6. Как классифицируются режущие рабочие органы?
7. Что такое степень измельчения?

Список литературы

Основная

1. Машины и аппараты пищевых производств: в 3 кн. Кн. 1/ред. В.А. Панфилов. - М.: КолосС, 2009. - 610 с.- ISBN 978-5-9532-0509-2
2. Машины и аппараты пищевых производств: в 3 кн. Кн. 3/ред. В.А. Панфилов. - 2-е изд., доп. и перераб. - М.: КолосС, 2009. - 551 с. ISBN 978-5-9532-0754-6
3. Процессы и аппараты пищевых производств: учебник для вузов. В 2-х кн. Кн. 1 / А.Н. Остриков, Ю.В. Красовичкий, А.А. Шевцов; ред. А.Н. Остриков. - СПб.: ГИОРД, 2007. - 704 с. ISBN 978-5-98879-041-9
4. Процессы и аппараты пищевых производств: учебник / Ю.М. Плаксин, Н.Н. Малахов, В.А. Ларин. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: КолосС, 2007. - 760 с. ISBN 978-5-9532-0581-8

Дополнительная

1. Процессы и аппараты пищевой технологии: учебник/Г.Д. Кавецкий, Б.В. Васильев. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Колос, 2000. - 551 с.
2. Процессы и аппараты пищевых производств: учебник / В.И. Горбатюк. - М.: Колос, 1999. - 330 с.

Лекция 3
ПРОЦЕССЫ ПРЕССОВАНИЯ ПИЩЕВЫХ СРЕД

1. Общая характеристика процесса прессования пищевых продуктов.
2. Обезвоживание и брикетирование.
3. Формование пищевых продуктов.

1. Общая характеристика процесса прессования пищевых продуктов

Прессование применяют для обезвоживания, брикетирования, гранулирования и формования продуктов, которое заключается в том, что обрабатываемый материал подвергают внешнему давлению. Формование пищевых продуктов проводят в экструдерах путем размягчения или пластификации и придания им формы продавливанием через экструзионную головку, сечение которой соответствует конфигурации изделия.

Для обезвоживания, брикетирования твердых материалов, гранулирования и формования пластичных продуктов в пищевой промышленности применяют *прессование,* которое заключается в том, что обрабатываемый материал подвергают внешнему давлению в специальных прессах.

Обезвоживание под давлением используется в жировом производстве для выделения из семян подсолнечника растительного масла, в сахарном производстве для отжима воды из свекловичного жома, сока из сахарного тростника, в производстве соков для выделения его из ягод и плодов и в других производствах.

Брикетирование, т. е. получение брикетов или брусков спрессованного материала прямоугольной или цилиндрической формы, применяют в сахарном производстве для получения брикетов свекловичного жома и сахара-рафинада, в производстве пищевых концентратов, в кондитерском и комбикормовом производствах, в процессах утилизации отходов пищевой промышленности и др. Разновидностями брикетирования являются *таблетирование* и *гранулирование.* Таблетки и гранулы имеют меньшие размеры по сравнению с брикетами.

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

Типы и конструкции формующих машин даны на рисунке 3.1.

2. Обезвоживание и брикетирование

Обезвоживание продуктов используют для выделения жидкости, когда она является ценным компонентом или когда с обезвоживанием ценность продукта увеличивается. Его проводят под действием избыточного давления поршня в прессах, которое прикладывается к материалу.

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

Жом, предназначенный для скармливания скоту, отжимается на прессах до содержания влаги 9... 10 %. Его получают в виде брикетов круглого сечения диаметром от 0,011 до 0,02 м или прямоугольного сечения высотой от 0,02 до 0,04 м. Плотность спрессованного жома составляет около 750 кг/м^3.

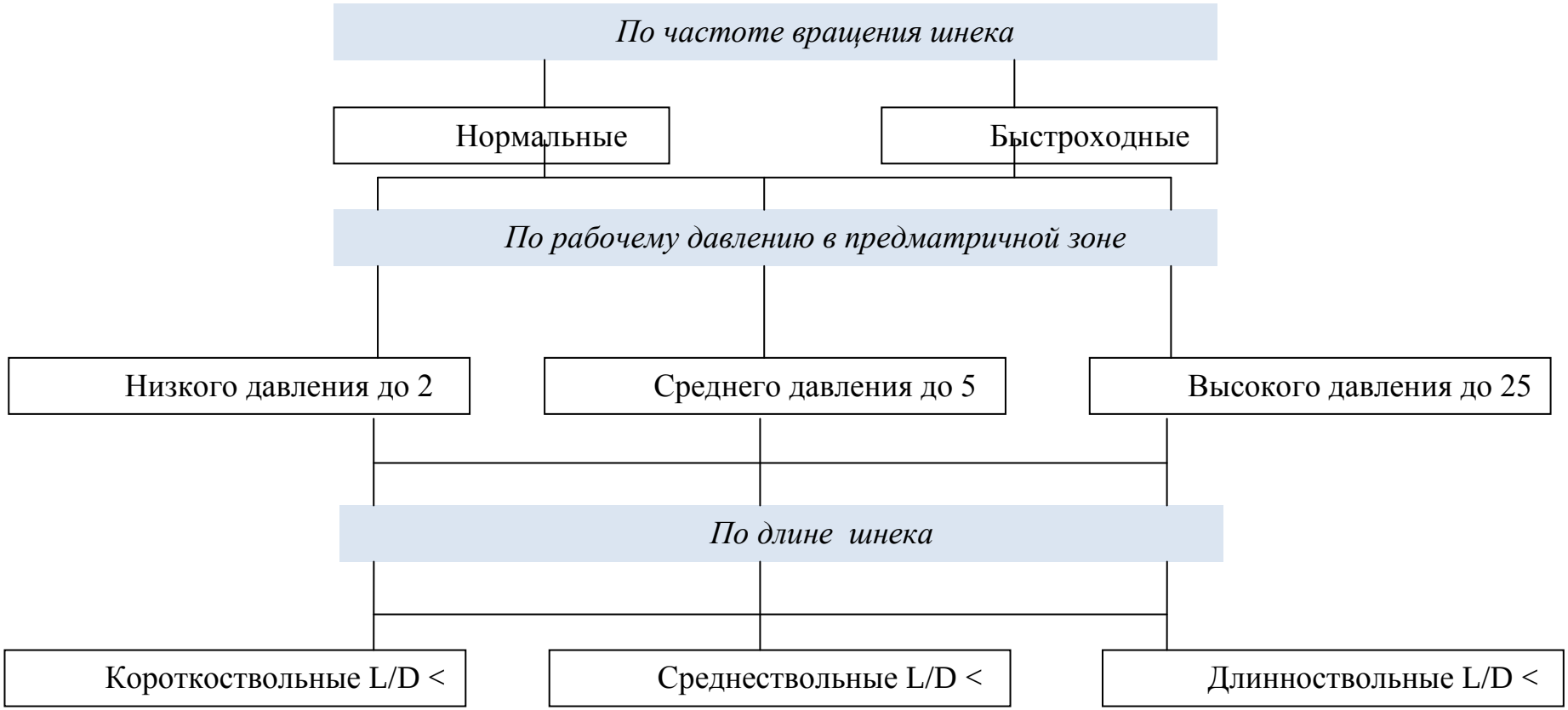
Степень отжатия влаги зависит от давления прессования. Однако большая степень отжатия приводит к уменьшению производительности пресса и увеличению удельного расхода энергии.

В сахарорафинадном производстве прессы применяют для получения брусков сахара-рафинада. При прессовании кашки значительно сокращается объем промежутков между кристаллами из-за перемещения их относительно друг друга, а промежутки заполняются осколками раздробленных кристаллов.

При прессовании создаются благоприятные условия для сращивания кристаллов в брикетах в процессе сушки. Брикетирование проводят в специальных прессах до плотности, при которой брикет не может самопроизвольно разрушаться. После прессования брикеты жома охлаждают, а сахара — высушивают.

Рисунок 3.1 – Типы и конструкции формующих машин

Продолжение рисунка 3.1



Сыпучий продукт в процессе прессования уплотняется вследствие тносительного смещения составляющих его частиц, а также в результате остаточных (необратимых) и упругих (обратимых) деформаций. В процессе уплотнения непрерывно изменяются структурно-механические свойства сжимаемого тела (рисунок 3.2).

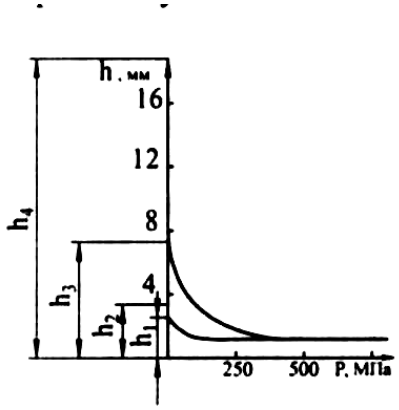


Рисунок 3.2 – График зависимости изменения размеров брикета от приложенного давления.

На первой стадии процесса уплотнения сближаются частицы, подгоняются их формы друг к другу. Из области высоких давлений частицы перемещаются в область более низких. Уплотнение происходит, главным образом, в результате изменения порозности частиц без значительного их деформирования. На этой стадии уже незначительное приращение давления приводит к заметному уплотнению обрабатываемого продукта. Т.е. в начальный период (рисунок 3.2) прессования до толщины брикета h_3 продукт сжимается без особых усилий.

Во второй стадии процесса происходят необратимые деформации – хрупкие и пластичные. Хрупкие деформации протекают с разрушением частиц, приводят к их более плотной укладке, а пластические – без разрушения частиц. Т.е., увеличение давления хотя и приводит к дальнейшему уменьшению высоты брикета, но этот процесс идет с затухающей скоростью.

В третьей стадии преобладают упругие деформации, при этом даже значительные повышения давления приводят к незначительному увеличению плотности. Конечно, провести четкую грань между этими стадиями нельзя. Т.е., даже значительное повышение давления не приводит к сколько-нибудь заметному изменению высоты брикета. Она при снятии давления увеличивается до значения h_1 и продолжает увеличиваться с течением времени до h_2 в результате проявления упругих деформаций и расширения запрессованного в продукт воздуха.

Показателем плотности брикета является коэффициент уплотнения β

$$\beta = \frac{V_4 - V_3}{V_4} = \frac{h_4 - h_3}{h_4}, \qquad (3.1)$$

где V_4 – объем прессуемого продукта, м^3; V_3 – объем брикета, м^3.

Кроме того, процесс брикетирования характеризуется величиной относительного упругого расширения брикета ε

$$\varepsilon = \frac{V_3 - V_2}{V_2} = \frac{h_3 - h_2}{h_2}, \qquad (3.2)$$

где V_3 – объем брикета, м^3; V_2 – минимальный объем брикета при максимальном давлении, м^3.

В процессе прессования необходимо стремиться к увеличению показателя β и снижению ε. На показатели β и ε оказывают влияние как условия процесса, так и физико-химические свойства прессуемых продуктов. К числу первых относят давление прессования, продолжительность выдерживания продукта под давлением, кратность нагружения, температуру рабочих органов и материала, конструктивные особенности и техническое состояние рабочих органов. Среди второй группы факторов можно выделить химический состав продукта, его дисперсность, коэффициенты внутреннего и внешнего трения, гигроскопические свойства, количество и свойства связующих веществ.

С увеличением давления прессования повышается плотность и прочность прессованных продуктов, большая продолжительность выдерживания продукта под давлением вызывает релаксацию напряжений в нем, снижение коэффициента упругого расширения брикета.

Важным фактором, влияющим на протекание процесса прессования, является температура продукта, т. к. она определяет состояние влаги и прочность ее связи с продуктом. Повышение температуры способствует миграции влаги, пластифицирует продукт, снижая величину показателя упругого расширения брикета ε. С повышением влажности увеличивается сцепление частиц, но избыток влаги препятствует их сближению.

Химический состав продуктов также влияет на прочность брикетов. Комбикорма, содержащие много клетчатки, образуют менее прочные брикеты или гранулы, требуют больших усилий для прессования. Более прочные гранулы образуют комбикорма с высоким содержанием белка и крахмала.

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

В пищевой промышленности применяют прессы самых разнообразных конструкций, которые можно разделить на две большие группы: гидравлические и механические. Гидравлический пресс, рисунок 6.2 Его основной узел – 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

$$P = pF \ , \text{Н}$$

где p – давление в гидросистеме, Н/м^2; F – площадь поршня, м^2 .

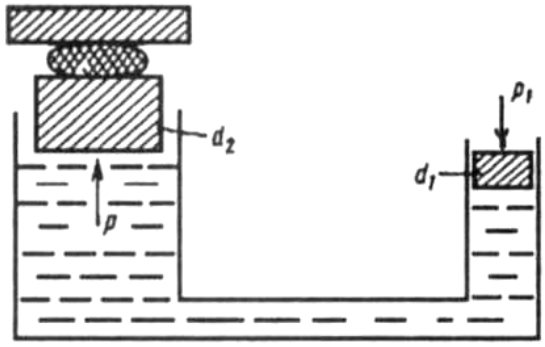


Рисунок 3.3 – Гидравлический пресс.

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

Принцип их работы заключается в том, что если приложить некоторую силу P_1 к поршню диаметром d_1 и создать гидростатическое давление на поршень p, то согласно закону Паскаля это давление будет воздействовать на поршень большего диаметра d_2.

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

Механические прессы. Для обезвоживания жома в сахарной промышленности применяют наклонные, горизонтальные и вертикальные шнековые прессы с одно- и двусторонним отжатием. Прессы двустороннего отжатия более производительны и позволяют отжимать жом до более низкой конечной влажности.

В наклонном шнековом прессе (рисунок 3.4) жом поступает в сепаратор, где из него частично удаляется вода, а затем в пресс, в котором отжимается ее основная часть. Часть отжатой воды проходит сквозь цилиндрическое сито *5* и удаляется через штуцер *9*, другая — через сито 3 поступает в полую часть вала шнека и удаляется через отверстие *10* и штуцер *9*. Отжатый жом выгружается через кольцевые отверстия между коническим ситом и корпусом отжимного шнека. Их размер влияет на продолжительность пребывания жома в прессе и степень отжатия воды и регулируется приспособлением *6*.

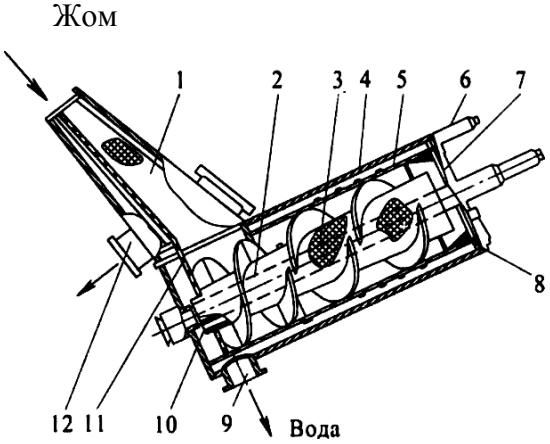


Рисунок 3.5. – Схема наклонного шнекового пресса:

1 – сепаратор; 2 – вал шнека; 3 – сито; 4 – отжимной шнек; 5 – цилиндрическое сито; 6 – регулировочное приспособление; 7 – отверстие для выгрузки жома; 8 – коническое сито; 9 – штуцер; 10 – отверстие для удаления воды; 11 – дополнительная поверхность фильтрования; 12 – штуцер для отвода воды.

Эффективность работы пресса определяется равномерностью питания его жомом. При недостаточной загрузке пресса влажность жома увеличивается.

Производительность пресса по отжатому жому, кг/с,

$$Q = \rho \cdot \varphi \cdot F \cdot t \frac{n}{60}, \qquad (3.3)$$

где ρ – плотность отжатого жома, кг/м^3; φ – отношение площади, занятой прерывистыми витками шнека, к площади винтовой поверхности; F – площадь кольцевого выходного отверстия или, в случае перфорированного диска, сумма площадей свободного сечения диска, м^2; t – шаг витка шнека в выходной щели, м; n – частота вращения шнека, мин$^{-1}$.

Мощность привода пресса, кВт, складывается из ряда составляющих

$$N = \frac{N_c + N_к + N_в + N_{сж} + N_п}{\eta_{пр}}, \qquad (3.4)$$

где N… соответ-но мощности, необходимые для преодоления сил трения продукта соответственно по ситовому корпусу, поверхности корпуса, поверхности витков шнека, для сжатия жома и его перемещения; $\eta_{пр}$ – коэффициент полезного действия привода. Основное влияние на степень отжатия жома оказывают форма проходной части пресса и время пребывания в нем жома.

Горизонтальные и наклонные прессы имеют аналогичную конструкцию. Но в отличие от горизонтальных в наклонных прессах не происходит частичного смешения отжатого жома с удаляемой жидкостью.

3. Формование пищевых продуктов

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

Экструзия бывает холодной, теплой и горячей (варочной). При холодной — происходит только механическое формование пластического сырья в результате продавливания его через матрицу. Этот вид экструзии применяют при выработке мучных изделий, макарон, плавленых сыров, конфетных масс, мясного фарша и других продуктов. Теплую экструзию используют для частичной клейстеризации крахмалсодержащих материалов влажностью 20...30 % с последующей обжаркой или выпечкой. При горячей (варочной) экструзии во время нагревания (температура процесса обработки сырья превышает 100 °С) в перерабатываемом материале происходят необратимые биохимические изменения, прежде всего, белков, крахмала и клетчатки.

Этот процесс проводится при высоких скоростях и давлениях, значительном переходе механической энергии в тепловую. Полученный таким образом экструдированный продукт затем сушат или обжаривают и покрывают вкусовыми добавками. Способом варочной экструзии получают сухие завтраки, хлебцы, сухие напитки, супы, мясопродукты, детское питание, гранулиро-ванные корма.

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

Рассмотрим классификацию шнековых экструдеров по конструктивным признакам (рисунок 3.6).

Кроме того, экструдеры могут быть классифицированы по геометрической форме, механическим, функциональным или термодинамическим параметрам, поскольку они оказывают влияние на химические и структурные характеристики экструдированных продуктов.

Применение двухшнековых (многошнековых) экструдеров в пищевой промышленности имеет значительное преимущество и гораздо большие перспективы перед одношнековыми.

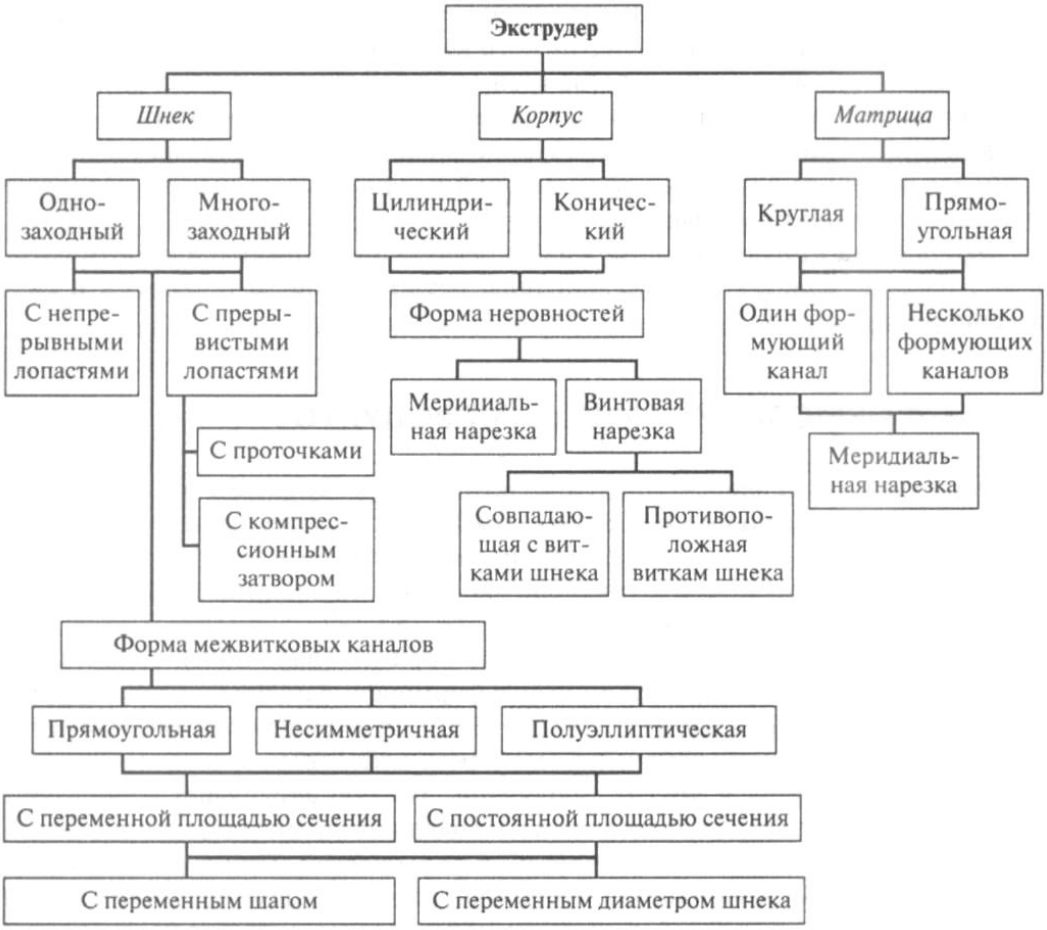


Рисунок 3.6 – Классификация шнековых экструдеров по конструктивным признакам

Классификация двухшнековых экструдеров приведена на рисунке 3.7.

При переработке пищевых продуктов наибольшее распространение получили двухшнековые экструдеры с зацепляющимися шнеками, вращающимися в одном направлении рисунке 5.6 а, когда вершины одного шнека взаимодействуют с впадинами другого, что позволяет производить самоочистку шнеков. Конструкция экструдера позволяет достичь высоких частот вращения рабочего органа и, как следствие, больших сдвиговых усилий действующих на продукт. Винтовой канал каждого из зацепляющихся шнеков разделен на С-образные камеры гребнями витков сопряженного шнека, между которыми ввиду малости боковых зазоров обмен материала не происходит. Материал заполняет С-образную полость, которая передается со шнека на шнек и таким образом осуществляется транспортировка продукта к выходу из экструдера.

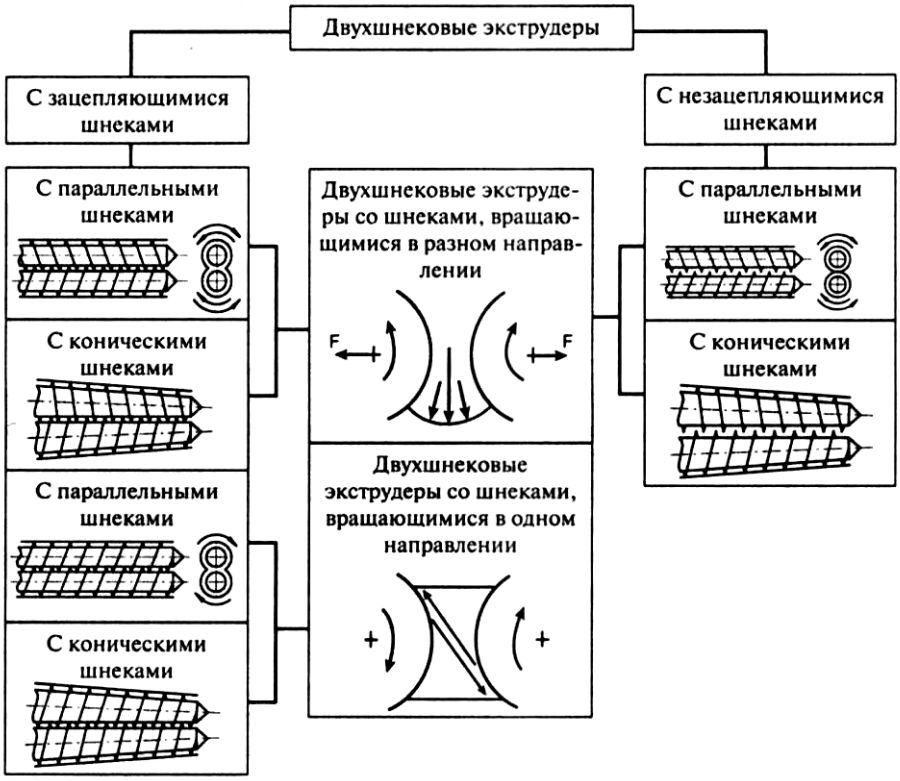
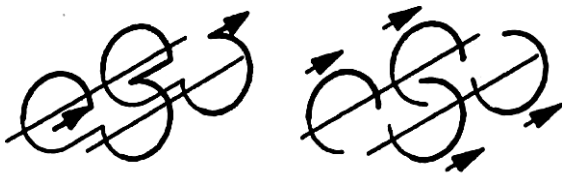


Рисунок 3.7 – Классификация двухшнековых экструдеров



а *б*

Рисунок 3.8 – Схемы движения материала в экструдерах с зацепляющимися шнеками:

а — при вращении шнеков в одном направлении;

б — при вращении шнеков в разном направлении

Двухшнековые экструдеры с зацепляющимися шнеками, вращающимися в разном направлении, обладают большей перемешивающей способностью, однако не получили широкого распространения из-за значительного износа корпуса и рабочего органа экструдера, кроме того частота вращения шнеков ограничена (рисунок 6.6 б*)*.

Износ возникает в результате прижатия шнеков к стенкам корпуса экструдера из-за образования «клинового участка» продукта между рабочими органами, который создает противоположно направленные разжимающие усилия.

Двухшнековые экструдеры с незацепляющимися шнеками, имеют перед одношнековыми преимущество лишь в лучшем перемешивании. Подобно одношнековым машинам они являются экструдерами трения и поэтому имеют те же недостатки, применяются в процессах холодной экструзии.

Необходимо отметить тенденцию производства экструдеров с использованием конических шнеков, это позволяет добиться ряда преимуществ перед традиционными цилиндрическими шнеками: возможность создавать большие давления, интенсифицировать перемешивание перерабатываемого продукта, повысить надежность и долговечность подшипникового узла экструдера. Из недостатков можно отметить только лишь сложность при изготовлении шнеков и корпуса экструдера. Главным элементом конструкции шнекового экструдера является его рабочий орган — шнек. Шнеки бывают как цельными (с одинаковым шагом витков) так и наборными (с различным шагом) с различной конфигурацией шнековых элементов.

Применение наборных шнеков позволяет:

- ♦ расширить технологические возможности экструдера по переработке материалов с различными реологическими свойствами;
- ♦ снизить затраты по замене вышедших из строя элементов, поскольку износ шнека по длине корпуса экструдера не равномерен.

Одной из характерных особенностей экструдеров является то, что их коэффициент теплопередачи достаточно высок и даже в случае переработки вязких материалов возможен гомогенный теплообмен в течение короткого промежутка времени (около 30 с). Таким образом, экструдеры можно считать теплообменниками с хорошими параметрами. Многие продукты питания чувствительны к нагреву, поэтому подвергать их тепловой обработке необходимо быстро. Используя экструдеры, можно осуществлять высокотемпературную обработку в течение короткого промежутка времени — в частности, проводить стерилизацию вязких материалов, что ранее было трудноосуществимо.

Следующее достоинство экструдеров состоит в том, что высокотемпературная обработка ведется практически в герметичном объеме. Создать в нем температуру порядка 200 °С несложно, а учитывая, что при такой температуре давление даже водяного пара превышает 1,5 МПа, известные устройства типа котлов можно считать сосудами высокого давления. Установки такого типа непрерывного действия имеют весьма сложную конструкцию, поэтому для переработки вязких материалов не используются. Экструдеры же позволяют получать очень высокие давления. Осуществлять экструдиро-вание с давлением сжатия 10 МПа и более не представляет особого труда. При таком высоком давлении в экструдере возникают большие силы сдвига, благодаря чему появляется возможность, например, формовать волокнистую структуру из белков растительного происхождения (т. е. получать изделия, имитирующие мясо), что невозможно в условиях традиционной технологии тепловой обработки. Благодаря высокому давлению значительно сокращается время варки. Кроме того, когда в условиях такого давления на выходе профилирующего устройства давление резко падает до атмосферного, происходит разбухание, что позволяет осуществлять формовку вязких материалов. Перегретый пар буквально взрывает выдавленный материал, что приводит к увеличению его объема (вспучиванию). Процесс экструзии позволяет направленно изменять свойства и структуру перерабатываемого материала, обеспечивает непрерывность процесса, а также возможность подачи в обрабатываемый материал ароматизаторов, красителей, пластификаторов и вкусовых добавок.

Достоинство экструдеров состоит также в том, что они обеспечивают равномерность перемешивания в течение короткого промежутка времени. Следует отметить, что возможности экструдеров подобны известным тестомешалкам и

смесителям сыпучих материалов. Смешивающая способность экструдеров зависит от типа червяков и их компоновки, частоты вращения.

Экструдеры позволяют за счет высокого давления, температуры, больших сдвиговых напряжений значительно уменьшить продолжительность технологических операций. При этом за счет совмещения нескольких операций сокращается продолжительность всего технологического процесса, что позволяет уменьшить трудоемкость и снизить энергопотребление.

Процесс варочной экструзии осуществляется следующим образом. Подготовленное исходное сырье в виде гранул или порошка из бункера/питателя через загрузочное отверстие поступает к шнеку, который перемещает его вдоль корпуса (рисунок 6.7).

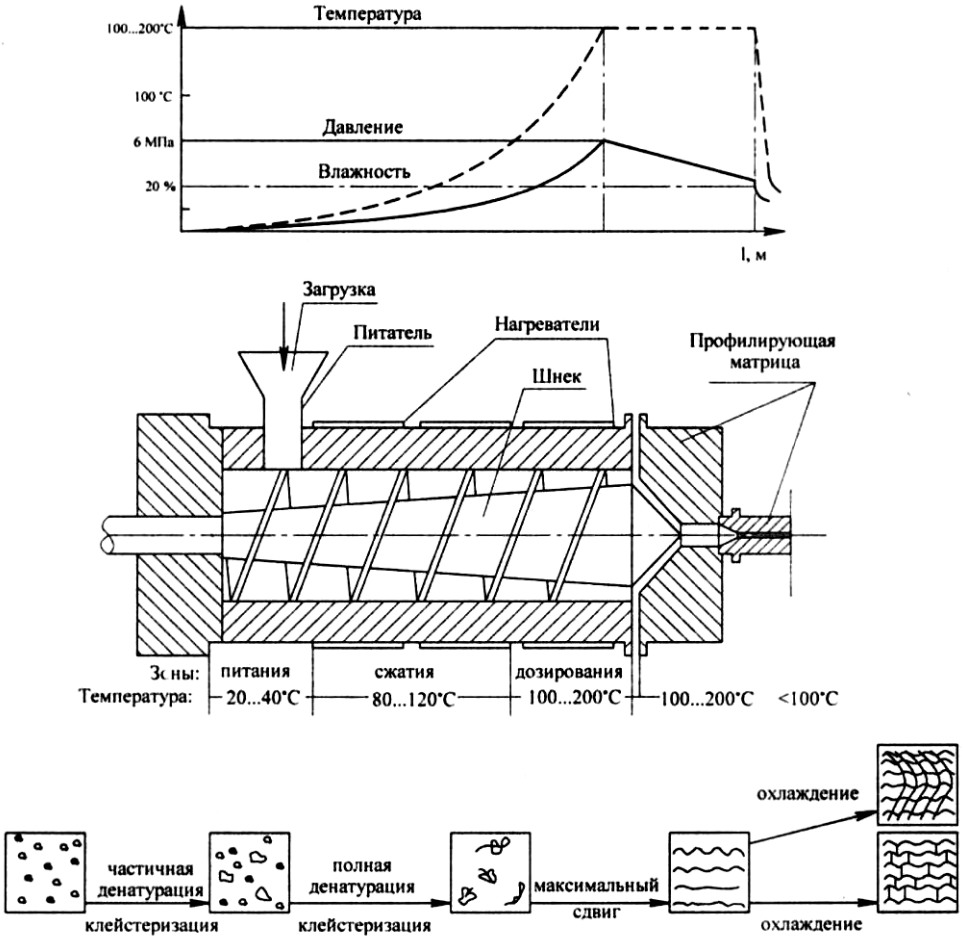


Рисунок 3.9 – Технологические зоны и изменение параметров процесса по длине рабочей зоны экструдера

Продукт внутри рабочей камеры движется по сложной траектории, при этом увеличивается степень сжатия, которая определяется отношением площади рабочего канала к суммарной площади фильер на выходе продукта из профилирующей матрицы. Таким образом, в ходе процесса исходный крах-малсодержащий материал, подвергнувшись термомеханической деструкции, переходит из дисперсного сыпучего состояния в упруговязкопластичную массу (гель), характерную для крахмальных клейстеров высоких концентраций и денатурированных белков. Эти превращения происходят при действии на сырье, с необходимым количеством влаги (до 20 %), высо-

ких температур (до 200 °С) и давления (до 25 МПа). Нагревается продукт как в результате преобразования механической энергии рабочих органов машины в тепловую энергию (продукт, уплотняясь, прогревается за счет сил трения частиц о поверхности вращающихся рабочих органов и деформаций сдвига в самом продукте) — автогенный режим работы, так и вследствие дополнительного регулируемого нагрева от внешнего источника тепла, например, электрообогрева — политропный режим работы. Образующаяся масса перемещается шнеком к матрице и при определенном давлении выпрессовывается через ее отверстия.

Величина давления в значительной мере обусловлена сопротивлением отверстий матрицы, конфигурацией шнека и структурно-механическими свойствами обрабатываемой массы. После выхода продукта из отверстий матрицы в результате резкого перепада температуры и давления (между зоной высокого давления (-25 МПа) и зоной атмосферного давления) происходит мгновенное ($1{,}2 \cdot 10^{-4}$ с) испарение влаги, аккумулированная продуктом энергия высвобождается со скоростью примерно равной скорости взрыва, что приводит к образованию пористой структуры и вспучиванию экструдата (производство кукурузных палочек).

Представляет интерес моделирование зоны плавления (сжатия) одношнекового экструдера, где происходит пластификация материала и почти полностью его плавление под действием тепла, подводимого от стенки корпуса, и тепла, выделяющегося в тонком слое расплава за счет работы сил вязкого трения.

Экструзионные продукты получаемые на пищевых экструдерах

- кукурузная палочка.
- подушечки и трубочки с начинкой.
- хрустящие хлебцы и соломка.
- фигурные сухие завтраки.
- хлопья кукурузные и из других злаков.
- быстрозавариваемые каши.
- детское питание.
- фигурные чипсы.
- экструзионные сухарики.
- мелкий шарик из риса, кукурузы, гречи, пшеницы, для наполнения и обсыпки шоколадных изделий, мороженого и других кондитерских изделий.
- пищевые отруби.
- набухающая мука, панировка.
- продукты вторичной переработки хлеба.
- соевые продукты: соевый текстурат, концентрат (применяются в производстве колбасы, сосисок, котлет и тд.), кусковые соевые продукты (фарш, гуляш, бифштекс, тушенка и тд.).
- корма для кошек, собак, домашних грызунов, крупного рогатого скота.
- корма для промысловых и аквариумных рыб.

Вопросы для самоконтроля

1. Для чего применяют прессование в пищевой промышленности?
2. Чем различаются обезвоживание и брикетирование продуктов?
3. Из каких составляющих складывается давление прессования?
4. Какое оборудование используют при обработке продуктов прессованием?
5. Опишите устройство и принцип работы экструдера.

6. Какие виды экструзии вы знаете?
7. Опишите принцип работы гидравлического пресса.
8. Что такое коэффициент уплотнения?
9. Что такое величина относительного упругого расширения брикета?

Список литературы

Основная

1. Машины и аппараты пищевых производств: в 3 кн. Кн. 1/ред. В.А. Панфилов. - М.: КолосС, 2009. - 610 с.- ISBN 978-5-9532-0509-2
2. Машины и аппараты пищевых производств: в 3 кн. Кн. 3/ред. В.А. Панфилов. - 2-е изд., доп. и перераб. - М.: КолосС, 2009. - 551 с. ISBN 978-5-9532-0754-6
3. Процессы и аппараты пищевых производств: учебник для вузов. В 2-х кн. Кн. 1 / А.Н. Остриков, Ю.В. Красовичкий, А.А. Шевцов; ред. А.Н. Остриков. - СПб.: ГИОРД, 2007. - 704 с. ISBN 978-5-98879-041-9
4. Процессы и аппараты пищевых производств: учебник / Ю.М. Плаксин, Н.Н. Малахов, В.А. Ларин. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: КолосС, 2007. - 760 с. ISBN 978-5-9532-0581-8

Дополнительная

1. Процессы и аппараты пищевой технологии: учебник/Г.Д. Кавецкий, Б.В. Васильев. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Колос, 2000. - 551 с.
2. Процессы и аппараты пищевых производств: учебник / В.И. Горбатюк. - М.: Колос, 1999. - 330 с.

Лекция 4
ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ. ПРОЦЕСС ПЕРЕМЕШИВАНИЯ

1. Общая характеристика процесса перемешивания.
2. Характеристика и применимость механических мешалок.
3. Способы перемешивания.

1. Общая характеристика процесса перемешивания

1. ***Перемешивание*** – это процесс создания гетерогенной системы посредством механической силы.

Цель процесса – равномерное распределение дисперсной фазы в дисперсионной среде.

Основные параметры процесса:

1) интенсивность – определяется количеством энергии, вводимой в ед. объема перемешиваемой среды в ед. времени.

2) эффективность – оценивается степенью полученной однородности в перемешиваемом объеме через некоторое время от начала процесса.

Перемешивание способствует интенсификации процессов тепло- и массообмена. Перемешивание применяется для образования эмульсий и суспензий и м/б классифицировано следующим образом: 1) перемешивание в жидкой среде (для этого процесса используется несколько способов: пневматический, циркуляционный, поточный, механический; 2) перемешивание сыпучих масс- осуществляется аппаратами периодического и непрерывного действия. Смесители могут быть тихоходные и быстроходные: лопастные, барабанные, шнековые (ворошители), центробежные (для перемешивания порошкообразных материалов); 3) перемешивание

пластических масс (тесто, фарш) - осуществляется аппаратами периодического и непрерывного действия, оборудованные рамными, шнековыми и ленточными мешалками.

Мешалки подразделяются по конструкции рабочего органа и по характеру создаваемого потока: на тангенциальный – поток, располагающийся только в плоскости лопасти, на радиальный – движение потока от вала к стенке аппарата и обратно (в аппаратах с оребренной поверхностью, аксиальный – движение потока вверх, вдоль вала и возвращение к низу аппарата.

2. Характеристика и применимость механических мешалок.

Механическое перемешивание жидкостей осуществляют лопастными, пропеллерными, турбинными и специальными мешалками.

Лопастные мешалки применяют для перемешивания жидкостей с небольшой вязкостью [до 0,01 $\Pi a \cdot c$], растворения и суспендирования твердых веществ с малым удельным весом, а также для грубого смешения жидкостей вязкостью меньше 2 $\Pi a \cdot c$. Эти мешалки не пригодны для быстрого растворения, тонкого диспергирования и получения суспензий, содержащих твердую фазу с большим удельным весом.

Лопастные мешалки, рисунок 4.1, отличаются простой конструкцией и низкой стоимостью изготовления. Они обеспечивают вполне удовлетворительное перемешивание жидкостей с умеренной вязкостью. Наиболее просты по устройству мешалки с плоскими лопастями из полосовой или угловой стали, установленными перпендикулярно или наклонно к направлению их движения. Частота вращения таких мешалок колеблется от 18 до 80 об/мин; при увеличении частоты вращения выше указанной эффективность перемешивания резко снижается. Диаметр лопастей составляет 0,7 диаметра сосуда, в котором работает мешалка.

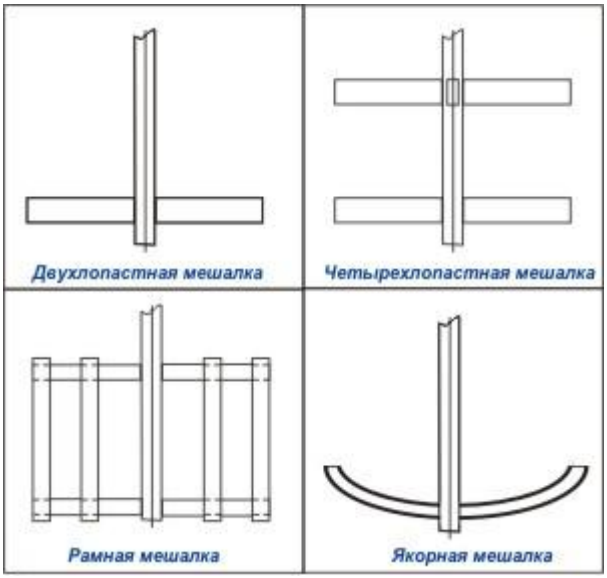


Рисунок 4.1 – Конструкции лопастных мешалок

Так как в таких устройствах создаются главным образом горизонтальные потоки жидкости, для улучшения перемешивания чаще применяют мешалки с горизонтальными и вертикальными лопастями, так называемые рамные мешалки. В случаях, когда для интенсификации процесса теплообмена необходимо удалять осадок со стенок аппарата или турбулизировать слои жидкости в непосредственной близости к поверхности теплообмена, применяют якорные мешалки, наружный контур которых соответствует очертаниям днища и корпуса аппарата.

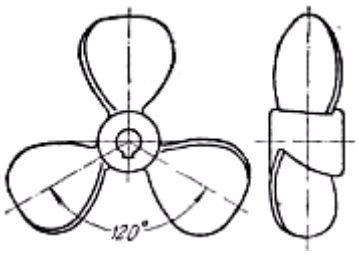
К общим недостаткам лопастных мешалок относятся малая интенсивность перемешивания густых и вязких жидкостей и плохое перемешивание по вертикали, что делает их непригодными для взмучивания тяжелых осадков и для работы с расслаивающимися жидкостями.

Эти мешалки непригодны для перемешивания в протоке, например в аппаратах непрерывного действия. Некоторое увеличение осевого потока жидкости достигается при наклоне лопастей под углом 30 – 45° к оси вала. Такая мешалка способна удерживать во взвешенном состоянии частицы, скорость осаждения которых невелика. С целью увеличения турбулентности среды при перемешивании лопастными мешалками в аппаратах с большим отношением высоты к диаметру используют **многорядные двухлопастные мешалки** с установкой на валу нескольких рядов мешалок, повернутых друг относительно друга на 90°. Расстояние между отдельными рядами выбирают в пределах (0,3 – 0,8d), где d – диаметр мешалки, в зависимости от вязкости перемешиваемой среды.

Пропеллерные мешалки, рисунок 4.2, применяют для интенсивного перемешивания маловязких жидкостей, взмучивании осадков, содержащих до 10% твердой фазы с размерами частиц до 0,15 мм, а также для приготовления суспензий и эмульсий. Пропеллерные мешалки не пригодны для совершенного смешивания жидкостей значительной вязкости [до 6 $\text{Па}\cdot\text{с}$] или жидкостей, включающих твердую фазу большого удельного веса.

Пропеллерная мешалка.

Типы пропеллерных мешалок



Пропеллерная мешалка с диффузором: 1— корпус аппарата; 2 — вал; 3 — пропеллер; 4 - диффузор.

Рисунок 4.2 – Конструкции пропейлерных мешалок

Рабочей частью пропеллерной мешалки является пропеллер – устройство с несколькими фасонными лопастями, изогнутыми по профилю гребного винта. Пропеллерные мешалки имеют две, три или четыре лопасти. Наибольшее распространение получили трехлопастные пропеллеры. На валу мешалки, который может быть расположен вертикально, горизонтально или наклонно, в зависимости от высоты слоя жидкости устанавливают один или несколько пропеллеров. Вследствие более обтекаемой формы пропеллерные мешалки при одинаковом числе Рейнольдса потребляют меньшую мощность, чем мешалки прочих типов. К достоинствам пропеллерных мешалок следует отнести также относительно высокую скорость вращения и возможность непосредственного присоединения мешалки к электродвигателю, что приводит к уменьшению механических потерь.

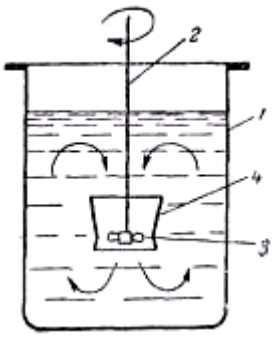
При использовании пропеллерных мешалок, вследствие изменения угла наклона от 45^0 у основания вала до 22^0 на конце лопасти по всей длине лопасти, частицы жидкости при перемешивании отталкиваются в любом направлении; в результате возникают встречные токи, способствующие интенсификации перемешивания.

Пропеллерные мешалки создают преимущественно осевые потоки перемешиваемой среды, что позволяет существенно сократить продолжительность перемешивания. Вместе с тем пропеллерные мешалки отличаются сложностью конструкции и сравнительно высокой стоимостью изготовления. Их эффективность сильно зависит от формы аппарата и расположения в нем мешалки. Пропеллерные мешалки следует применять в цилиндрических аппаратах с выпуклыми днищами. При установке их в прямоугольных баках или аппаратах с плоскими или вогнутыми днищами интенсивность перемешивания падает вследствие образования застойных зон.

Для улучшения перемешивания больших объемов жидкостей и организации направленного течения жидкости (при большом отношении высоты к диаметру аппарата) в сосудах устанавливают направляющий аппарат, или диффузор (рис.). Диффузор представляет собой короткий цилиндрический или конический стакан, внутри которого помещают мешалку. При больших скоростях вращения мешалки в отсутствие диффузора в аппарате устанавливают отражательные перегородки. Для пропеллерных мешалок принимают следующие соотношения основных размеров: диаметр мешалки d = (0,2—0,5) D, шаг винта s=(1,0— 3,0) D, расстояние от мешалки до дна сосуда h=(0,5—1,0) d, высота уровня жидкости в сосуде H=(0,8—1,2)D. Число оборотов пропеллерных мешалок достигает 40 в секунду, окружная скорость — 15 *м/сек.*

Турбинные мешалки пригодны для непрерывных процессов.

Мешалка, рисунок 4.4, состоит из одного или нескольких центробежных колес (турбинок), с плоскими, наклонными или криволинейными лопатками, укрепленных на вертикальном валу. Турбинные мешалки могут быть двух типов: открытого и закрытого типов. Закрытые мешалки устанавливают внутри направляющего аппарата представляющего собой неподвижное кольцо с лопатками; последние изогнуты под углом, изменяющимся от 45 до 90°. Применяют для интенсивного перемешивания и смешения жидкостей с вязкостью до 10 $\text{Па}\cdot\text{с}$) для мешалок открытого типа и до 50 $\text{Па}\cdot\text{с}$ для мешалок закрытого типа; для тонкого диспергирования, быстрого растворения или выделения осадков в больших объемах (5—6 $м^3$).



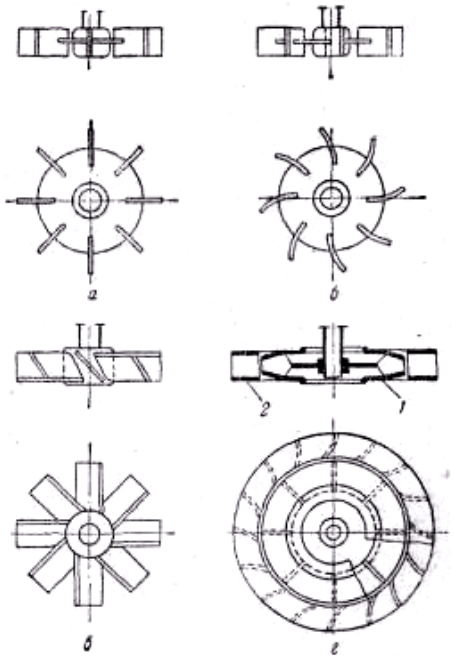


Рисунок 4.3 - Турбинные мешалки:
а – открытая с прямыми лопатками
б – открытая криволинейными лопатками
в – открытая с наклонными лопатками
г – закрытая с направляющим аппаратом

1 – турбинная мешалка
2 – направляющий аппарат

Работают по принципу центробежного насоса, т.е. всасывают жидкость в середину и за счет центробежной силы отбрасывают ее к периферии.

Эти мешалки используют для взмучивания осадков в жидкостях, содержащих до 60% твердой фазы (мешалки открытого типа) и более (мешалки закрытого типа); причем максимальные размеры твердых частиц до 1,5 мм для мешалок открытого типа и до 2,5 мм для мешалок закрытого типа.

В аппаратах с турбинными мешалками создаются преимущественно радиальные потоки жидкости. При работе турбинных мешалок с большим числом оборотов наряду с радиальным потоком возможно возникновение тангенциального (кругового) течения содержимого аппарата и образование воронки. В этом случае в аппарате устанавливают отражательные перегородки. Закрытые турбинные мешалки (рис. 4.3) в отличие от открытых (рис. 4.3, а, б, в) создают более четко выраженный радиальный поток. Закрытые мешалки имеют два диска с отверстиями в центре для прохода жидкости; диски сверху и снизу привариваются к плоским лопастям. Жидкость поступает в мешалку параллельно оси вала, выбрасывается мешалкой в радиальном направлении и достигает наиболее удаленных точек аппарата. Турбинные мешалки обеспечивают интенсивное перемешивание во всем объеме аппарата. При больших значениях отношения высоты к диаметру аппарата применяют многорядные турбинные мешалки. Мощность, потребляемая турбинными мешалками, работающими в аппаратах с отражательными перегородками, при турбулентном режиме перемешивания практически не зависит от вязкости среды. Поэтому мешалки этого типа могут применяться для смесей, вязкость которых во время перемешивания изменяется.

В зависимости от области применения турбинные мешалки обычно имеют диаметр d = (0,15—0,65) D при отношении высоты уровня жидкости к диаметру аппарата не более двух. При больших значениях этого отношения используют многорядные мешалки. Число оборотов мешалки колеблется в пределах 2—5 в секунду, а окружная скорость составляет 3—8 м/сек.

3. Способы перемешивания

Перемешивание в жидких средах осуществляется несколькими способами:

- пневматическое перемешивание,
- циркуляционное,
- поточное перемешивание.

Пневматическое перемешивание сжатым инертным газом или воздухом используют, когда перемешиваемая жидкость отличается большой химической активностью и быстро разрушает механические мешалки. Перемешивание сжатым газом является малоинтенсивным процессом. Расход энергии при пневматическом перемешивании больше, чем при механическом. Пневматическое перемешивание не применяют для обработки летучих жидкостей в связи со значительными потерями перемешиваемого продукта. Перемешивание воздухом может сопровождаться окислением или осмолением веществ. Перемешивание сжатым газом проводят в аппаратах, снабженных специальными устройствами — барботером или центральной циркуляционной трубой. Барботер представляет собой расположенные по дну аппарата трубы с отверстиями, с помощью которых осуществляется барботаж газа через слой обрабатываемой жидкости. При циркуляционном (эрлифтном) перемешивании газ подают в циркуляционную трубу. Пузырьки газа увлекают за собой вверх по трубе

жидкость, находящуюся в сосуде, которая затем опускается вниз в кольцевом пространстве между трубой и стенками аппарата, обеспечивая циркуляционное перемешивание жидкости. При расчете пневматических мешалок определяют необходимое давление и расход газа.

Циркуляционное и поточное перемешивание.

Поэтому для перемешивания жидкостей, содержащихся в аппарате, достаточно поставить рядом с аппаратом циркуляционный насос, который в течение некоторого времени будет перекачивать жидкость. Такое перемешивание называют **циркуляционным**. Эффективность перемешивания значительно возрастает, если жидкость в аппарате распыляется или вводится тангенциально. Интенсивность циркуляционного перемешивания зависит от расхода жидкости в циркуляционном насосе и объёма самого аппарата.

Поточное перемешивание создается путем искусственной турбулизации. Для перемешивания невязких жидкостей в трубопроводах устраивают смесители, рабочий орган которых выполнен из последовательно установленных разнозакрученных шнеков или турбинок. Поточное перемешивание осуществляется за счет многократного изменения направления движения, приводящего к возникновению интенсивной турбулизации потока.

Вопросы для самоконтроля

2. Что такое перемешивание?
3. Какова цель процесса перемешивания?
4. Назовите основные параметры процесса перемешивания.
5. Какие виды перемешивания вы знаете?
6. Перечислите недостатки и достоинства механических мешалок?
7. В чем заключается циркуляционное перемешивание?
8. В чем заключается пневматическое перемешивание?
9. В чем заключается поточное перемешивание

Список литературы

Основная

1. Машины и аппараты пищевых производств: в 3 кн. Кн. 1/ред. В.А. Панфилов. - М.: КолосС, 2009. - 610 с.- ISBN 978-5-9532-0509-2
2. Машины и аппараты пищевых производств: в 3 кн. Кн. 3/ред. В.А. Панфилов. - 2-е изд., доп. и перераб. - М.: КолосС, 2009. - 551 с. ISBN 978-5-9532-0754-6
3. Процессы и аппараты пищевых производств: учебник для вузов. В 2-х кн. Кн. 1 / А.Н. Остриков, Ю.В. Красовичкий, А.А. Шевцов; ред. А.Н. Остриков. - СПб.: ГИОРД, 2007. - 704 с. ISBN 978-5-98879-041-9
4. Процессы и аппараты пищевых производств: учебник / Ю.М. Плаксин, Н.Н. Малахов, В.А. Ларин. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: КолосС, 2007. - 760 с. ISBN 978-5-9532-0581-8

Дополнительная

1. Процессы и аппараты пищевой технологии: учебник/Г.Д. Кавецкий, Б.В. Васильев. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Колос, 2000. - 551 с.
2. Процессы и аппараты пищевых производств: учебник / В.И. Горбатюк. - М.: Колос, 1999. - 330 с.

Лекция 5, 6
ПРОЦЕСС ФИЛЬТРОВАНИЯ

1. Общая характеристика процесса фильтрования.
2. Кинетика процесса фильтрования (дифференциальное и критериальное уравнения процесса).
3. Аппаратура для реализации процесса фильтрования. Классификация оборудования и принцип действия фильтров.

1. Общая характеристика процесса фильтрования.

Фильтрование – это процесс, при котом происходит разделение гетерогенных смесей путем пропускания из через пористую перегородку, которая называется фильтром.

Материал фильтрующей перегородки.

Выбор материала фильтрующей перегородки обусловлен степенью агрессивности суспензии и дисперсностью ее твердой фазы. Фильтрующие перегородки изготовляют из текстильных и волокнистых материалов: бязи, парусины, сукна, шелка, асбеста, шлаковой и стеклянной ваты, бумаги и картона.

Для повышения кислотостойкости хлопчатобумажной ткани ее подвергают нитрованию. Шерстяные ткани устойчивы к кислотам, но разрушаются щелочами. Наиболее устойчивы фильтрующие перегородки из асбеста, шлаковой и стеклянной ваты, а также металлические сетки из бронзы и коррозионностойкой стали.

В качестве материала для зернистых или волокнистых продуктов применяют песок, инфузорную землю, кокс, уголь, целлюлозу и др. такие перегородки используют в случаях, когда твердая фаза суспензии имеется в малом количестве и не используется после фильтрования.

В качестве жестких фильтрующих перегородок применяют керамические фильтровальные камни, плитки, свечи и кольца, стойкие к действию кислот и щелочей и позволяющие получить чистый фильтрат. Коллоидные пленки или материалы изготавливают из нитроцеллюлозы, пергаментной бумаги и др. Эти фильтрующие перегородки имеют очень мелкие поры (13 мкм) и могут задерживать коллоидные частицы.

Для осуществления фильтрования необходимо создать разность давлений по обе стороны от перегородки, которая выполняет роль начального сопротивления для протекания процесса, поэтому скорость процесса фильтрования прямо пропорциональна разности давлений и обратно пропорциональна сопротивлению пористой перегородки и осадка. Дополнительное сопротивление на фильтрующей перегородке возрастает при увеличении толщины осадка или закупоривании его частицами фильтра. Наличие давления также приводит к увеличению сопротивления в них пор для прохождения фильтрата и изменения их формы (из-за сжатия сдвига).

Пористая перегородка создает при фильтровании первоначальное сопротивление, обусловленное вязкостью жидкой фазы (фильтрата), диаметром, формой поперечного сечения и извилистостью каналов пор. Это сопротивление может изменяться из-за набухания материала перегородки, изменения поверхностного натяжения системы жидкость – твердая перегородка, адсорбции жидкости на стенках, возникновения неподвижного слоя жидкости у стенок пор и электроосмотического потока жидкости, а также от частичного или полного перекрывания пор твердыми частицами суспензий.

Осадок создает обычно основную долю сопротивления протеканию процесса. Это сопротивление зависит в основном от структуры и толщины осадка, на него влияют также физико-химические факторы системы жидкость – твердое тело.

Структура осадков по крупности частиц изменяется, начиная от фильтрующей перегородки, где осаждаются самые мелкие частицы, проникающие в ее поры. Затем осаждаются более крупные частицы, но между ним располагаются и более мелкие, закупоривающие пространство между крупными частицами.

На протекание процесса фильтрования влияет две группы факторов, Микрофакторы: размеры и форма пор, по которым движется жидкость в осадке к фильтровальной перегородке. Макрофакторы: структура и геометрия фильтровальной перегородки и слоя осадка, вязкость фильтрата, разность давлений по сторонам фильтра.

В процессе фильтрования частицы отделяемой смеси могут отлагаться как на поверхности фильтра в виде осадка, так и в самом фильтре, постепенно забивая его поры. В связи с этим различают:

Фильтрация с образованием слоя осадка:

Этот способ характеризуется наибольшей полнотой разделения смеси, т.к. осадок создает дополнительный фильтрующий эффект. После достижения определенной толщины осадка фильтрацию прерывают для его удаления. Поэтому такой процесс носит периодический характер. Возможен непрерывный процесс, при котором с помощью скребка непрерывно или периодически удаляется избыточная часть слоя осадка, но это требует сложных и дорогостоящих устройств.

Фильтрация с образованием концентрата дисперсной фазы:

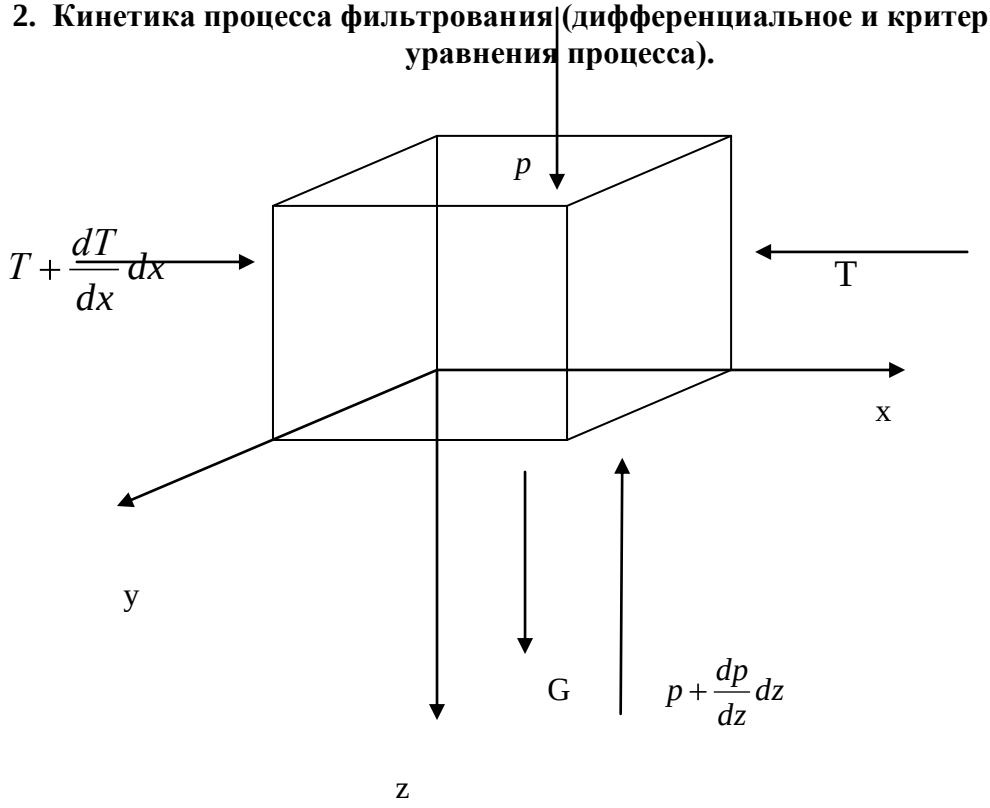
При этом способе предотвращается образование осадка на фильтре. Это достигается перемешиванием фильтруемой жидкости перед фильтром.

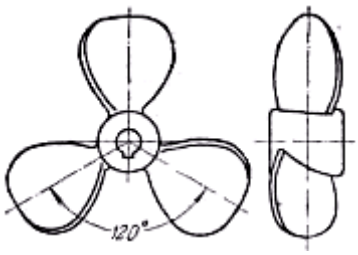
Фильтрация с осаждением дисперсной фазы внутри пор фильтрующей перегородки:

Этот способ используют при малых концентрациях частиц дисперсной фазы в очищаемых от них жидкостях. В качестве фильтрующей среды используют слой зернистых материалов (песок) или сменные фильтрующие элементы. При достижении предела поглощающей способности такие фильтрующие перегородки снижают полноту очистки фильтрата и их заменяют новыми или регенерируют. Регенерация слоя зернистого материала не связана с необходимостью разборки фильтра и достигается обратной промывкой слоя растворителем.

В зависимости от средних размеров частиц дисперсной фазы диаметра частиц различают процессы: фильтрации (диаметр частицы > 100 мкм), микрофильтрация (100 мкм >диаметр частицы > 0,05 мкм), обратного осмоса (диаметр частицы < $5 \cdot 10^3$ мкм)

2. Кинетика процесса фильтрования (дифференциальное и критериальное уравнения процесса).





При фильтровании поток жидкости проходит через пористую
Дифференциальное уравнение движения несжимаемой вязкой жидко
одномерного движения получают, выделяя в потоке жидкости, движущ
элементарный параллелепипед объемом dV с ребрами dx, dy, dz. Н
действую три силы: сила тяжести G, сила давления P, сила трения T.

Сила тяжести $G = \rho_ж g dV = \rho_ж g dx dy dz$

Если на верхней грани параллелепипеда давление P_1, то проекция на верхнюю грань действует сила $P_1 = pdxdy$. На нижней грани давление $p+\frac{dp}{dz}dz$, а сила давления $P_z = \left(p+\frac{dp}{dz}dz\right)dxdy$.

Результирующая этих сил является силой давления на параллелепипед.

$$pdxdy - \left(p+\frac{dp}{dz}dz\right)dxdy = -\frac{dp}{dz}dxdydz \quad , \qquad (5.1)$$

Обозначим силу трения, отнесенную к ед. поверхности через T. Сила, действующая на грань $-Tdzdy$. Сила трения у противоположной грани $\left(T+\frac{dT}{dx}dx\right)dzdy$. Результирующая этих сил является силой трения, действующей на параллелепипед:

$$-Tdzdy+\left(T+\frac{dT}{dx}dx\right)dzdy = \frac{dT}{dx}dxdydz, \qquad (5.2)$$

Согласно закону Ньютона: $T = \mu_{ж} \frac{d\upsilon}{dx}$, следовательно:

$$\frac{dT}{dx} dxdydz = \mu_{ж} \frac{d^2\upsilon_z}{dx^2} dxdydz , \quad (5.3)$$

На основании закону механики равнодействующая сил равна массе умноженной на ускорение.

$$\rho_{ж} g dxdydz - \frac{dp}{dz} dzdxdy + \mu_{ж} \frac{d^2\upsilon_z}{dx^2} dxdydz = \rho_{ж} \frac{d\upsilon_z}{d\tau} dxdydz , \quad (5.4)$$

или

$$\rho_{ж} g - \frac{dp}{dz} + \mu_{ж} \frac{d^2\upsilon_z}{dx^2} = \rho_{ж} \frac{d\upsilon_z}{d\tau} , \quad (5.5)$$

Дифференциальное уравнение носит название уравнения Навье-Стокса.

Разделим все члены уравнения на $\rho_{ж} \frac{d\upsilon_z}{d\tau}$, тогда получим:

$$g \frac{d\tau}{d\upsilon_z} - \frac{dp}{dz} \frac{d\tau}{\rho_{ж} d\upsilon_z} + \mu_{ж} \frac{d^2\upsilon_z}{dx^2} \frac{d\tau}{\rho_{ж} d\upsilon_z} = 1 , \quad (5.6)$$

Вычеркнем из уравнения все знаки дифференцирования, а x и z заменим на линейный размер l, тогда получим:

Первое слагаемое:

$$g \frac{\tau}{\upsilon_z} = g \frac{\tau}{\upsilon_z} \cdot \frac{l}{l} = \frac{gl}{\upsilon^2} = Fr , \quad (5.7)$$

критерий Фруда – характеризует отношение сил тяжести к инерционным силам.

Второе слагаемое:

$$\frac{p}{l} \frac{\tau}{\rho_{ж} \upsilon_z} = \frac{p}{\rho_{ж} \upsilon_z^2} = Eu , \quad (5.8)$$

критерий Эйлера – характеризует отношение сил давления к инерционным силам.

Третье слагаемое:

$$\mu_{ж} \frac{\upsilon_z}{l^2} \frac{\tau}{\rho_{ж} \upsilon_z} = \frac{\mu_{ж}}{l \rho_{ж} \upsilon_z} = \frac{1}{\mathrm{Re}} , \quad (5.9)$$

величина, обратная критерию Рейнольдса, характеризующему режим движения жидкости.

Так как при фильтровании силы тяжести малы по сравнению с силами давления и силами трения, то ими можно пренебречь, следовательно в критериальное уравнение критерий Фруда не вводится. Вместо него вводят характерный геометрический размер $\frac{l}{d_{экв}}$ фильтра: его толщина и диаметр перегородки:

$$\mathrm{Eu} = A \, \mathrm{Re}^n \left(\frac{l}{d_{эк}} \right)^m , \quad (5.10)$$

Коэффициент A и показатели степеней n и m определяются экспериментально.

3. Аппаратура для реализации процесса фильтрования. Классификация оборудования и принцип действия фильтров.

Основанные на одинаковых принципах фильтры могут различаться конструктивными решениями. Выбор конструкции фильтра зависит от величины создаваемого перепада давлений, производительности процесса, свойств разделяемой системы, вспомогательных операций.

Фильтры *периодического* действия используются на производствах малой мощности, где предусмотрена минимальная механизация технического обслуживания. В них осадок удаляется после прекращения процесса фильтрования.

Фильтры *непрерывного* действия обычно применяют при большой производительности. Такие фильтры снабжают устройствами механизированного удаления осадка.

Большое промышленное распространение получили нутч-фильтры, фильтр-прессы, ленточные фильтры.

Применяются центрифуги периодического и непрерывного действия. Они подразделяются по способу выгрузки осадка на центрифуги с ручной и центробежной выгрузкой.

При разработке новых видов фильтровального оборудования следует ориентироваться на создание компактных аппаратов с развитой фильтровальной поверхностью, позволяющих проводить ее регенерацию без остановки технологического процесса.

Нутч-фильтр (рисунок 5.1.), работающий как под вакуумом, так и под избыточным давлением, широко распространен в малотоннажных производствах. Выгрузка из него осадка механизирована. Для сброса осадка фильтр снабжен перемешивающим устройством в виде однолопастной мешалки. Для удаления осадка из фильтра на цилиндрической части корпуса предусмотрен люк.

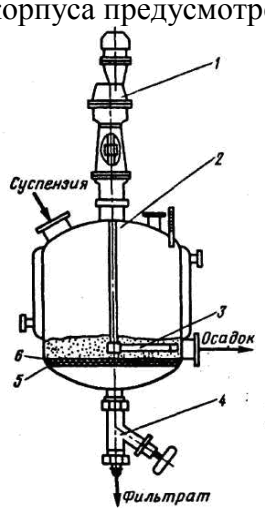


Рисунок 5.1. – Нутч-фильтр с перемешивающим устройством:
1 – привод, 2 – корпус фильтра, 3 – мешалка, 4 – спускной кран, 5 – фильтровальная перегородка, 6 – фильтровальная ткань

Суспензия и сжатый воздух подаются через раздельные штуцера, фильтрат удаляется через спускной кран 4. Фильтр снабжен предохранительным клапаном.

Цикл работы фильтра состоит из заполнения его суспензией, фильтрования суспензии под давлением, удаления осадка с фильтровальной перегородки при

вращающейся мешалке и регенерации фильтровальной перегородки. В таких фильтрах может проводиться одновременно промывка осадка.

Для фильтрования суспензии применяют фильтровальные перегородки из картона, бельтинга и синтетических волокон. Преимуществами фильтровальных перегородок из синтетических волокон являются высокая механическая прочность, термическая и химическая стойкость.

Из синтетических волокон изготовляют фильтровальные перегородки с постепенно изменяющейся плотностью, что обеспечивает глубинное фильтрование суспензий, содержащих малое количество твердой фазы. Меняющаяся по глубине плотность фильтровального материала позволяет захватывать частицы по всей глубине фильтра. При этом крупные частицы задерживаются в наружных, а мелкие — в глубинных слоях фильтра. Селективное фильтрование обеспечивает высокую скорость фильтруемой среды, предотвращает закупоривание поверхностных пор и продлевает срок службы фильтров.

Рамный фильтр-пресс (рисунок 3.2.) используется для осветления виноматериалов, вина, молока и пива. Фильтрующий блок состоит из чередующихся рам и плит с зажатой между ними фильтровальной тканью или картоном. Рамы и плиты зажимаются в направляющих 6 зажимным винтом 1.5. Фильтр монтируют на металлической станине.

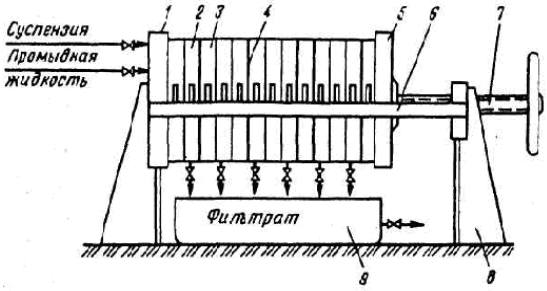


Рисунок 5.2. – Рамный фильтр-пресс:
1 – опорная плита; 2 – рама; 3 – плита; 4 – фильтровальная перегородка; 5 – подвижная плита; 6 – горизонтальная направляющая; 7 – винт; 8 – станина; 9 – желоб

Каждая рама и плита (рисунок 3.3.) имеют каналы для ввода суспензии и промывной жидкости. На поверхности плит с обеих сторон расположены сборные каналы 4, ограниченные сверху дренажными каналами, а снизу отводным каналом.

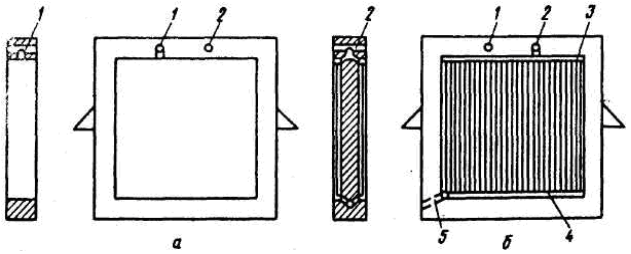


Рисунок 5.3. – Рама (а) и плита (б) фильтр-пресса:
1,2 – каналы для ввода суспензии и промывной жидкости; 3 – жренажный канал; 4 – сборный канал; 5 – отводной канал

При фильтровании (рисунок 5.3, а) суспензия под давлением подается через каналы в рамах и плитах и распределяется по всем рамам. Фильтрат стекает по дренажным и сборным каналам в плитах и удаляется через отводные каналы. При промывке осадка (рисунок 5.4, б) промывная жидкость под давлением вводится через

соответствующие каналы, распределяется по рамам и проходит обратным током через фильтровальную перегородку, промывает осадок, а затем удаляется из фильтра через отводные каналы. При промывке отводные каналы всех нечетных плит блока должны быть закрыты.

Основной недостаток рамных фильтр-прессов – трудоемкость выгрузки осадка и замены фильтровальной перегородки. Для выгрузки осадка необходимы разборка вручную фильтровального блока и промывка плит и рам.

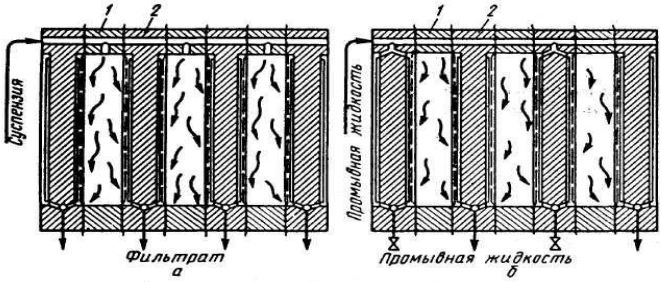


Рисунок 5.4. – Схема работы фильтр-пресса:
а – фильтрование; б – промывка осадка; 1 – рама; 2 – плита

Фильтр-пресс автоматизированный камерный с механизированной выгрузкой осадка (ФПАКМ) используют для разделения тонкодисперсных суспензий концентрацией 10...500 кг/м^3 при температурах до 80 °С. Является фильтром периодического действия. Он состоит из ряда прямоугольных фильтров (рисунок 3.5), расположенных вплотную один под другим, благодаря чему возрастает удельная площадь поверхности фильтрования по отношению к площади, занимаемой фильтром.

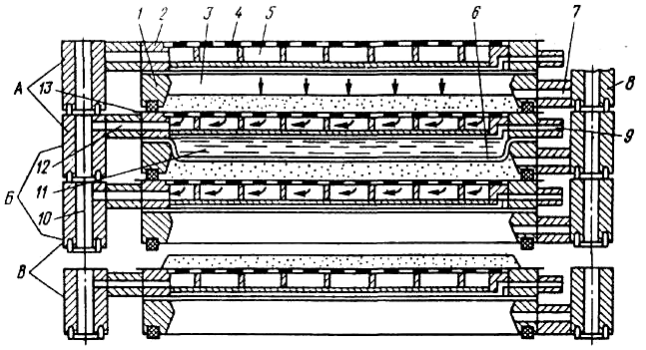


Рисунок 5.5 – Фильтр-пресс с горизонтальными камерами (ФПАКМ):
1 – нижняя плита; 2 – верхняя плита; 3 – пространство для суспензии и осадка; 4 – перфорированный лист; 5 – пространство для фильтрата; 6 – эластичная диафрагма; 7, 9, 12 – каналы; 8 – коллектор для суспензии; 10 – коллектор для отвода фильтрата; 11 – пространство для воды; 13 – фильтровальная ткань

В положении А в камеру из коллектора 8 последовательно поступают суспензия на разделение, жидкость для промывки и сжатый воздух для подсушки осадка. Фильтрат, промывная жидкость и воздух отводятся по каналам 12 в коллектор 10. В пространстве 11 по каналам 9 подается вода под давлением, которая с помощью водонепроницаемой диафрагмы 6 отжимает осадок (положение Б). Затем плиты раздвигаются и осадок удаляется из фильтра через образовавшиеся щели (положение В).

Барабанные вакуум-фильтры применяют при непрерывном разделении суспензий концентрацией 50...500 кг/м^3. Твердые частицы могут иметь

кристаллическую, волокнистую, аморфную, коллоидальную структуру. Производительность фильтра зависит от структуры твердых частиц и снижается в указанной выше последовательности.

Барабанные вакуум-фильтры (рисунок 3.6) выпускают с внешней и внутренней фильтрующей поверхностью, которая обтягивается текстильной фильтровальной тканью. Вращающийся горизонтальный перфорированный барабан разделен перегородками на несколько секций одинаковой формы, которые за оборот барабана проходят несколько рабочих зон: фильтрования, обезвоживания, промывки, удаления осадка и регенерации фильтровальной ткани. Устройством, управляющим работой фильтра, является распределительная головка, через которую секции барабана в определенной последовательности подсоединяют к магистралям вакуума, сжатого воздуха и промывной жидкости.

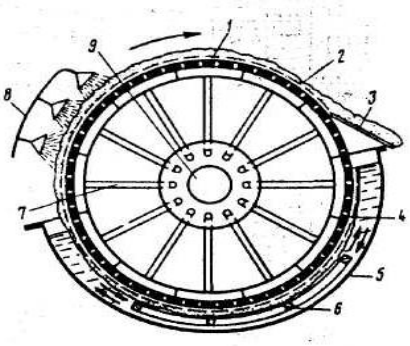


Рисунок 5.6 – Барабанный вакуум-фильтр с распределительной головкой:
1 – перфорированный барабан; 2 – фильтровальная ткань; 3 – ножевое устройство; 4 – секция; 5 – корыто; 6 – мешалка; 7 – труба; 8 – разбрызгиватель; 9 – распределительная головка

В стадии фильтрования зона фильтра под фильтрующей тканью соединяется с вакуумом и фильтрат, находящийся в корыте, проходит через фильтровальную ткань. Осадок откладывается на ее поверхности. Промытый и подсушенный осадок непрерывно срезается ножом. Чтобы взвешенные частицы не отстаивались, корыто снабжено качающейся мешалкой.

Для извлечения пива и дрожжей из дрожжевой суспензии, образующейся при седиментации в бродильных чанах и танках, применяют барабанный вакуум-фильтр, изображенный на рисунок 5.8. Фильтровальный элемент состоит из крупноячеистой сетки, на которую накладывается мелкоячеистая сетка. Для улучшения условий фильтрования на мелкоячеистую сетку намывается слой вспомогательного материала — кизельгура либо картофельного крахмала. Пивная или дрожжевая суспензия, подаваемая из бака, при вращении барабана равномерно распределяется по фильтровальной поверхности, а дрожжевой осадок (лепешка) срезается ножом, установленным над баком.

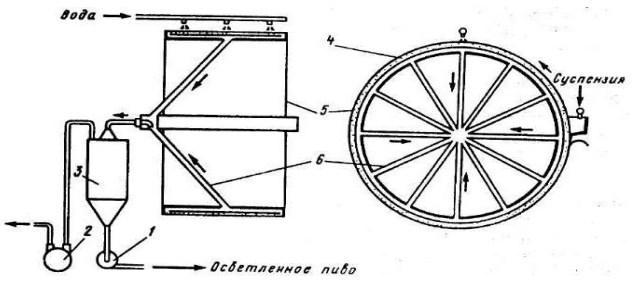


Рисунок 5.7 – Барабанный вакуум-фильтр:
1 – насос для фильтрата; 2 – вакуум-насос; 3 – пеногаситель; 4 – фильтровальный элемент; 5 – барабан; 6 – труба для фильтрата

Содержание сухих веществ в дрожжевой лепешке достигает 25...28 %.

Обрызгивание подсыхающей лепешки водой способствует увеличению выхода пива примерно на 20 %.

Детали фильтра, находящиеся в контакте с фильтрующей средой, выполнены из нержавеющей стали. Все детали фильтра легко очищаются.

Схема фильтровальной установки с барабанным вакуум-фильтром показана на рисунок 5.9. Суспензия подается в корыто фильтра, где установлена качающаяся мешалка, препятствующая сепарации крупных твердых частиц большой плотности. При погружении 30 % поверхности барабана в суспензию он подключается к вакуум-насосу. Фильтрат и промывная жидкость собираются в сборниках 3, где от них отделяется воздух, поступивший в фильтр во время обезвоживания и промывки осадка, и затем откачиваются насосами.

Дисковые фильтры (рисунок 3.8) применяют для разделения тонкодисперсных суспензий; они работают под давлением с намывным слоем вспомогательного вещества. Дисковый фильтр представляет собой вертикальную емкость с обогреваемой рубашкой. Внутри фильтра на полый вал 6 насажены дисковые металлические перфорированные фильтровальные элементы 1.5. На диски натягивают полипропиленовую или другую фильтровальную ткань, закрепляемую хомутами. Рабочее давление в фильтре достигает 0,5 МПа, в рубашке – 0,3 МПа.

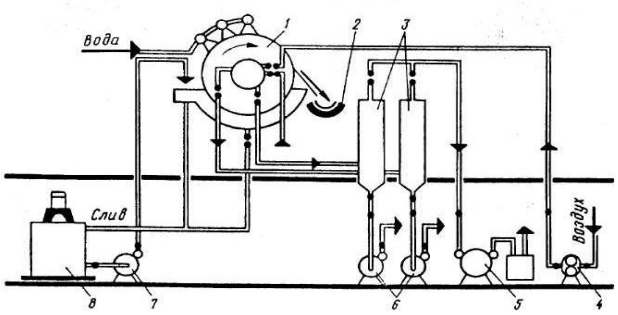


Рисунок 5.8 – Схема фильтровальной установки:
1 – барабанный вакуум-фильтр; 2 – приемник осадка; 3 – сборники фильтрата и промывной жидкости; 4 – воздуходувка; 5 – вакуум-насос; 6 – насосы для отбора фильтрата и промывной жидкости; 7 – насос для суспензии; 8 – ёмкость для суспензии

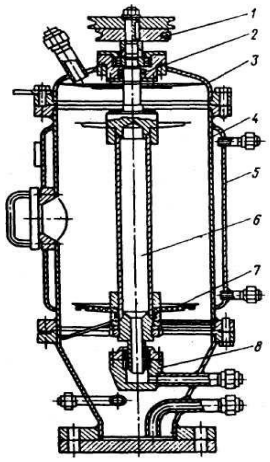


Рисунок 5.9 – Дисковый фильтр:
1 – шкив; 2 - сальниковое уплотнение; 3 – крышка; 4 - корпус фильтра; 5 – рубашка; 6 – вал; 7 - фильтровальный элемент; 8 – подпятник

В дисковых фильтрах предусмотрен центробежный сброс подсушенного осадка. Полый вал вместе с фильтровальными дисками приводится во вращение электро- и гидродвигателем. Частота вращения вала достигает 250 мин$^{-1}$. Вал имеет сальниковые тефлоновые уплотнения.

Перед фильтрованием на фильтровальные элементы намывают слой вспомогательного вещества, суспензия которого готовится в суспензаторе. Готовая суспензия прокачивается насосом через фильтровальные элементы до образования намывного слоя толщиной 15...30 мм. Фильтрат из дисков через отверстия в полом валу поступает внутрь вала и выводится из фильтра в суспензатор. Аналогичным образом проводится фильтрование суспензии. После окончания фильтрования осадок промывается обратным током фильтрата и подсушивается воздухом.

Ленточный фильтр (рисунок 3.10.) состоит из рамы, приводного и натяжного барабанов, между которыми натянута бесконечная перфорированная резиновая лента. Под ней расположены вакуум-камеры, соединенные в нижней части с коллекторами для отвода фильтрата и промывной жидкости. За счет вакуума лента прижимается к верхней части вакуум-камер. К резиновой ленте натяжными роликами 7 прижимается фильтровальная ткань, выполненная также в виде бесконечной ленты.

Суспензия подается на фильтровальную ткань из лотка 5. Фильтрат под вакуумом отсасывается в камеры и отводится через коллектор в сборник. Промывная жидкость подается через форсунки 2 на образовавшийся осадок и отсасывается в камеры, из которых через коллектор 9 отводится в сборник.

На приводном барабане фильтрующая ткань отделяется от резиновой ленты и огибает направляющий ролик. При этом осадок соскальзывает с фильтровальной ткани и падает в сборник осадка.

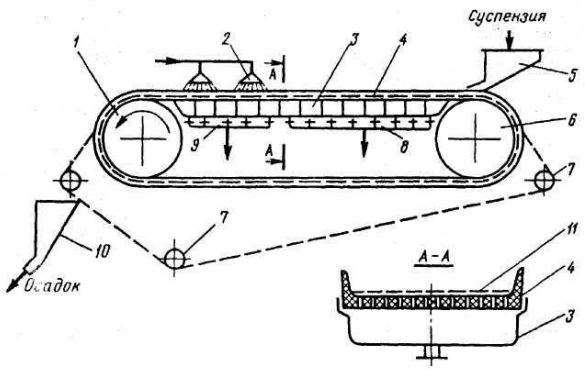


Рисунок 5.10 – Ленточный вакуум-фильтр:
1 – приводной барабан; 2 – форсунка; 3 – вакуум-камера; 4 – резиновая лента; 5 – лоток; 6 – натяжной барабан; 7 – натяжные ролики; 8 – коллектор для отвода фильтра; 9 – коллектор для отвода промывной жидкости; 10 – сборник осадка; 11 – фильтровальная ткань

При прохождении фильтровальной ткани между роликами 7 она промывается, просушивается и очищается.

Фильтрующие центрифуги периодического и непрерывного действия разделяются по расположению вала на вертикальные и горизонтальные, по способу выгрузки осадка – на центрифуги с ручной, гравитационной, пульсирующей и центробежной выгрузкой осадка. Главным отличием фильтрующих центрифуг от отстойных является то, что они имеют перфорированный барабан, обтянутый фильтровальной тканью.

В фильтрующей центрифуге периодического действия (рисунок 3.11.) суспензия загружается в барабан сверху. После загрузки суспензии барабан приводится во вращение. Суспензия под действием центробежной силы отбрасывается к внутренней стенке барабана. Жидкая дисперсионная фаза проходит через фильтровальную перегородку, а осадок выпадает на ней. Фильт- рат по сливному патрубку направляется в сборник. Осадок после окончания цикла фильтрования выгружают вручную через крышку 3.

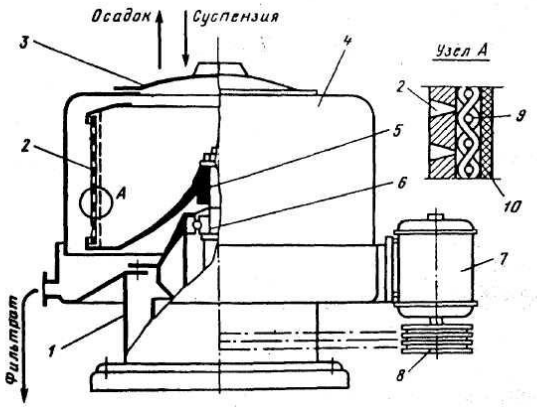


Рисунок 5.11 – Фильтрующая центрифуга периодического действия:
1 – станина; 2 – перфорированный барабан; 3 – крышка; 4 – кожух; 5 – ступица; 6 – подшипник; 7 – электродвигатель; 8 – шкив с ременной передачей; 9 – дренажная сетка; 10 – фильтрующая ткань

Конструкция фильтрующей центрифуги с перфорированным барабаном аналогична конструкции автоматической отстойной центрифуги с непрерывным ножевым съемом осадка.

В саморазгружающихся центрифугах (рисунок 3.12) осадок удаляется под действием гравитационной силы. Такие центрифуги выполняют с вертикальным валом, на котором располагается перфорированный барабан. Суспензия подается на загрузочный диск при вращении барабана с низкой частотой. Нижняя часть барабана имеет коническую форму, причем угол наклона делается большим, чем угол естественного откоса осадка. После окончания цикла фильтрования и остановки барабана осадок под действием гравитационной силы сползает со стенок барабана и удаляется из центрифуги через нижний люк.

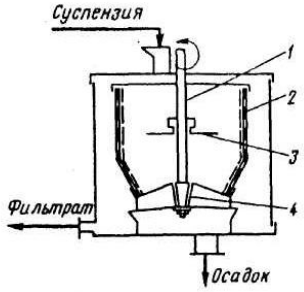


Рисунок 5.12 – Центрифуга с гравитацонной выгрузкой осадка:
1 – вал; 2 – барабан; 3 – распределительный диск, 4 – упорная втулка

В непрерывно действующих фильтрующих центрифугах с пульсирующей выгрузкой осадка (рисунок 3.13) фильтрат из центрифуги выводится непрерывно, а осадок периодически выгружается из барабана пульсирующим поршнем.

Поршень-толкатель перемещается в горизонтальном направлении в барабане с помощью штока, который находится внутри полого вала барабана. Шток вращается вместе с валом и совершает одновременно возвратно-поступательные движения (10... 16 ходов в минуту, длина каждого хода составляет примерно 0,1 длины барабабана). Сервомеханизм автоматически изменяет направление движения поршня.

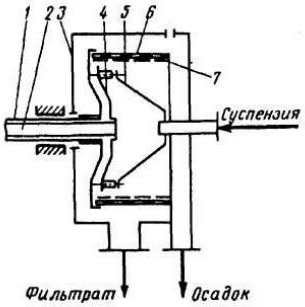


Рисунок 5.13 – Центрифуга непрерывного действия с пульсирующей выгрузкой осадка:
1 – полый вал; 2 – шток; 3 – корпус; 4 - поршень – толкатель; 5 – приемный конус;
6 – барабан; 7 – сито

Суспензия подводится по оси вала в приемный конус. В конусе имеются отверстия, по которым суспензия поступает в барабан. Внутренняя поверхность барабана покрыта фильтровальным ситом. Осадок, отложившийся на поверхности сита,

промывается и перемещается поршнем к открытому концу барабана. Из барабана осадок выгружается в камеру для осадка.

Центрифуга непрерывного действия с центробежной выгрузкой осадка имеет конический перфорированный барабан, внутри которого вращается шнек со скоростью, несколько меньшей скорости вращения барабана. При вращении витки шнека снимают с барабана отложившийся осадок и перемещают его в нижнюю часть барабана, в камеру для осадка. Выгрузка осадка происходит под действием центробежной силы. При этом осадок не измельчается, его структура не изменяется, как, например, в центрифугах с ножевым срезом и выгрузкой осадка пульсирующим поршнем.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое фильтрование?
2. Какие виды фильтрования вы знаете? Охарактеризуйте их.
3. Какие критерии подобия входят в уравнение фильтрования?
4. Какое оборудование для реализации процесса фильтрования вы знаете?
5. Какие виды фильтров применяют в пищевой промышленности?
6. Чему равняется равнодействующая сил по закону Ньютона?
7. Дайте характеристику критерию Фруда, Эйлера и критерию Рейнольдса.

Список литературы

Основная

1. Машины и аппараты пищевых производств: в 3 кн. Кн. 1/ред. В.А. Панфилов. - М.: КолосС, 2009. - 610 с.- ISBN 978-5-9532-0509-2
2. Машины и аппараты пищевых производств: в 3 кн. Кн. 3/ред. В.А. Панфилов. - 2-е изд., доп. и перераб. - М.: КолосС, 2009. - 551 с. ISBN 978-5-9532-0754-6
3. Процессы и аппараты пищевых производств: учебник для вузов. В 2-х кн. Кн. 1 / А.Н. Остриков, Ю.В. Красовичкий, А.А. Шевцов; ред. А.Н. Остриков. - СПб.: ГИОРД, 2007. - 704 с. ISBN 978-5-98879-041-9
4. Процессы и аппараты пищевых производств: учебник / Ю.М. Плаксин, Н.Н. Малахов, В.А. Ларин. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: КолосС, 2007. - 760 с. ISBN 978-5-9532-0581-8

Дополнительная

1. Процессы и аппараты пищевой технологии: учебник/Г.Д. Кавецкий, Б.В. Васильев. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Колос, 2000. - 551 с.
2. Процессы и аппараты пищевых производств: учебник / В.И. Горбатюк. - М.: Колос, 1999. - 330 с.

Лекция 7

ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ. ПРОЦЕСС ОСАЖДЕНИЯ

1. Общая характеристика процесса осаждения.
2.Осаждение в поле действия сил тяжести.
3. Осаждение в центробежном поле.

1. Общая характеристика процесса осаждения.

Классификация неоднородных систем представлена на рисунке5.1.

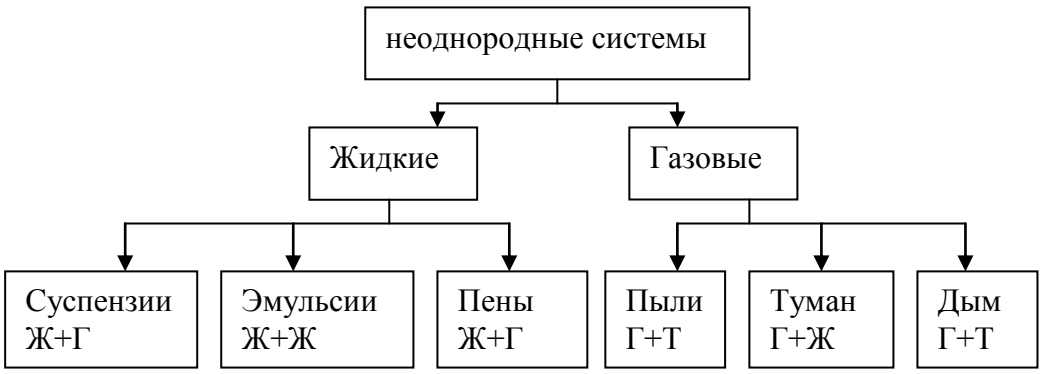


Рисунок 7.1 – Классификация неоднородных систем

В пищевых производствах часто возникает задача разделения неоднородных систем на составные части. Так, в производстве вина требуется его осветление твердых частиц от жидкой фазы; пивное сусло отделяют от дробины. В мясоперерабатывающей и рыбной промышленности проводят осветление рыбьего жира в жиромучных установках прессосушильного типа, очистку жира от загрязнений и разделение крови на фракции. В молочном производстве проводят сепарирование молока, а также отделение жира в сыворотке. Все предприятия и города снабжены очистными сооружениями, где главным составляющим оборудованием являются отстойники.

Что же такое осаждение по определению химической энциклопедии?

ОСАЖДЕНИЕ - выделение в виде малорастворимого соединения (твердого осадка) из газа (пара), раствора (эмульсии или суспензии) одного или нескольких компонентов. Для этого создают условия, когда система из исходного устойчивого состояния переходит в неустойчивое и в ней происходит образование твердой фазы.

Осаждение твердой фазы из р-ров можно добиться различными способами: удалением растворителя выпариванием, изменением кислотности среды, состава р-рителя, напр. добавлением к полярному растворителю (воде) менее полярного (ацетон или этанол). Последний процесс часто называют *высаливанием.* Широко применяют для **осаждения** различные химические реагенты-осадители, взаимодействующие с выделяемыми элементами с образованием малорастворимых соединений, которые выпадают в осадок.

В пищевой промышленности под **осаждением** понимают механическое отделение взвешенных частиц от жидкости в суспензии под действием силы тяжести. Эти процессы наз. также седиментацией, оседанием, отстаиванием, сгущением (если **осаждение** проводят с целью получения плотного осадка) или осветлением (если получают чистые жидкости). При сгущении и осветлении часто дополнительно применяют фильтрование.

К осаждению относится **отстаивание** – это осаждение под действием сил тяжести и **центрифугирование** - осаждение под действием центробежных сил.

2. Осаждение в поле действия сил тяжести

При **осаждение** под действием силы тяжести в камере различают три зоны с различными скоростями **осаждение**: в зоне свободного падения частиц она постоянна, затем в переходной зоне уменьшается и, наконец, в зоне уплотнения резко падает до нуля.

В промышленности **отстаивание** осуществляют с помощью отстойников (иногда наз. также сгустителями или осветлителями), которые бывают периодического и непрерывного действия. Процесс этот медлительный. Однако простые аппаратурное оформление процесса и низкие энергетические затраты определили широкое применение этого метода в пищевой промышленности. При отстаивании должны соблюдаться следующие условия:

- продолжительность пребывания разделяемого потока должно быть больше или равна времени осаждения частиц, $\tau_{преб} \geq \tau_{осаж}$.
- линейная скорость потока должна быть меньше скорости осаждения, $v < v_{осажд}$.

Т.к. при нарушении первого условия частицы не успевают выделиться и осесть в аппарате, а при нарушении второго возникающие вихревые потоки взмучивают и уносят осаждающие частицы из отстойника.

Рассмотрим работу отстойника, рисунок 6.2.

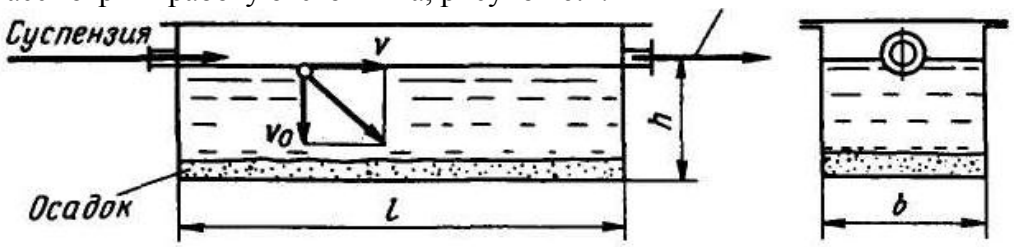


Рисунок 7.2 – Отстойник

Рабочий объём отстойника:

$$V = l \cdot h \cdot b = V_\tau \cdot \tau_0 ; м^3, \quad (7.1)$$

где l –длина отстойника;
h – высота отстойника;
b - ширина отстойника.
V_τ – секундная производительность отстойника, $м^3/с$;
τ_o – средняя продолжительность отстаивания частиц, с.

Последняя связана со средней скоростью отстаивания частиц v_o соотношением:

$$\tau_0 = h / v_0 , с \quad (7.2)$$

Удельная производительность отстойника

$$V_\tau = l \cdot b \cdot v_0 , м^3/с \quad (7.3)$$

Т.е она равна произведению площадь отстаивания (F_o=l·b) на скорость отстаивания

$$V_\tau = F_0 \cdot v_0 , м^3/с \quad (7.4)$$

Следовательно, продолжительность отстаивания можно сократить, если уменьшить высоту слоя жидкости (путь отстаивания). Это условие реализовано в

конструкциях многоярусных отстойников и тарельчатых сепараторов. А также для увеличения производительности отстойника надо увеличить пов-сть, на которую оседает осадок, для чего и применяют наклонные перегородки (полки).

Процессы **отстаивания** различаются в зависимости от конструкции отстойника и характера обрабатываемой жидкости, а именно по направлению движения потока суспензии отстойники делятся на радиальные, горизонтальные, вертикальные и наклонные. В радиальных отстойниках суспензия подается в центр аппарата и движется к периферии. В горизонтальных - она загружается с одного конца аппарата и передвигается вдоль него. В вертикальных - суспензия подается снизу и поднимается вверх, причем скорость восходящего потока должна быть меньше скорости оседания твердых частиц (иногда для ускорения **осаждение** исходную смесь подают под слой сгущающегося осадка). В наклонных - **осаждение** осуществляется в пакетах пластин (или труб), наклоненных под углом 45-60°.

Следует учитывать, что процессы осаждения осложняются при турбулентном потоке разделяемой суспензии, который часто наблюдается в вертикальных отстойниках, а также в горизонтальных при Re > 500. В этом случае траектории движения частиц искривляются, жидкость перемешивается, что способствует переносу твердых частиц и их транспортированию во взвешенном состоянии на значит. расстояния.

Эффективность отстаивания суспензий существенно повышается при ламинарном режиме течения, который обеспечивается соответствующей скоростью подачи жидкости, так и применением перегородок (горизонтальных, наклонных или вертикальных).

Раз мы затронули тему режимов движения в процессе отстаивания, то вспомним, что мы с вами рассматривали режимы движения жидкостей и что они определяются числовым значением критерием Re. При процессе осаждения эти числовые значения другие, а именно при небольшой скорости частицы слои жидкости плавно набегают на нее и слои не смешиваются – это ламинарный режим движения Re < 2.

При увеличении скорости движения частицы плавность обтекания нарушается и появляются завихрения – переходный режим 2 < Re < 500.

Если еще увеличивать скорость, то струйки срываются и образуются сильные вихри – турбулентный режим Re > 500.

Мы увидели, что производительность отстойника зависит от скорости осаждения, а от чего же зависит эта скорость? При воздействии гравитации результирующая вертикальная движущая сила равна разноси между весом частицы G и Архимедовой выталкивающей силой А. Движущая сила уравновешена силой сопротивления среды движению частицы R. Рассмотрим движение частицы в форме шара, рисунок 6.3.

На частицу действует сила тяжести:

$$G = m \cdot g = \frac{\pi d^3}{6} \rho_ч g, \text{ Н} \quad , \tag{7.5}$$

а также Архимедова сила:

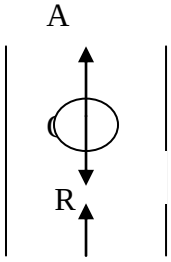


Рисунок 7.3 – Движение частицы в форме шара

$$A = V\rho_ж g = \frac{\pi d^3}{6}\rho_ж g, \text{ Н} \quad , \tag{7.6}$$

следовательно сила, заставляющая частицу падать:

$$G - A = \frac{\pi d^3}{6}(\rho_ч - \rho_ж)g, \text{Н} \tag{7.7}$$

Сила сопротивления среды определяется по формуле Ньютона из уравнения:

$$R = \xi \cdot F \cdot \rho_ж \cdot \omega_{ос}^2 / 2, \tag{7.8}$$

где $\omega_{ос}$ - скорость перемещения частицы;

ξ - коэффициент сопротивления среды, зависящий от режима движения.

при Re < 2 ξ = 24/Re

2 < Re < 500 ξ = 18,5/$Re^{0,6}$

Re > 500 ξ = 0,44

В начальный момент времени частица движется ускоренно под действием силы F. По мере нарастания скорости частицы увеличивается сопротивление среды R и уменьшается ускорение частицы. Наступает такой момент, когда F = R, и частица начинает двигаться с постоянной скоростью, которая называется скоростью осаждения.

Т.е. в итоге сила G – A становится равна силе R частица начинает двигаться без ускорения с равномерной скоростью $\omega_{ос}$, т.е. приравниваем формулы (7.7) и (7.8), при этом учитывая, что площадь $F = \frac{\pi d^2}{4}$.

$$\frac{\pi d^3}{6}(\rho_ч - \rho_ж)g = \xi\frac{\pi d^2}{4}\rho_ж\frac{\omega_{ос}^2}{2} \quad , \tag{7.9}$$

и, решая уравнения относительно скорости, получим:

$$\omega_{ос} = \sqrt{4gd(\rho_ч - \rho_ж)/3\rho_ж\xi}, \tag{7.10}$$

Если режим движения ламинарный, что чаще всего встречается в отстойниках, то при $Re = \frac{\omega_{ос} \cdot d \cdot \rho_ж}{\mu}$,

$$\omega_{ос} = gd^2(\rho_ч - \rho_ж)/18\mu. \tag{7.11}$$

Нами была выведена формула СТОКСА.

Для частиц нешарообразной формы скорость осаждения $\omega'_{ос} = \omega_{ос} \cdot f$,

где f – коэффициент, учитывающий форму частиц :

для частиц округлых f = 0,77;

для угловатых – 0,66;

для продолговатых – 0,58;

для пластинчатых – 0,43.

3. Осаждение в центробежном поле

Осаждение под действием центробежных сил проводят с целью ускорения разделения пыли, суспензий и эмульсий. Для создания поля центробежных сил используются два технологических приёма:

- поток жидкости или газа вращается в неподвижном аппарате;
- поток поступает во вращающийся аппарат и вращается вместе с ним.

В первом случае процесс называется циклонным, а аппарат – циклоном; во втором – отстойным центрифугированием, а аппарат – отстойной центрифугой или сепаратором.

Рассмотрим действие простейшего циклона (гидроциклона), рисунок 7.4.

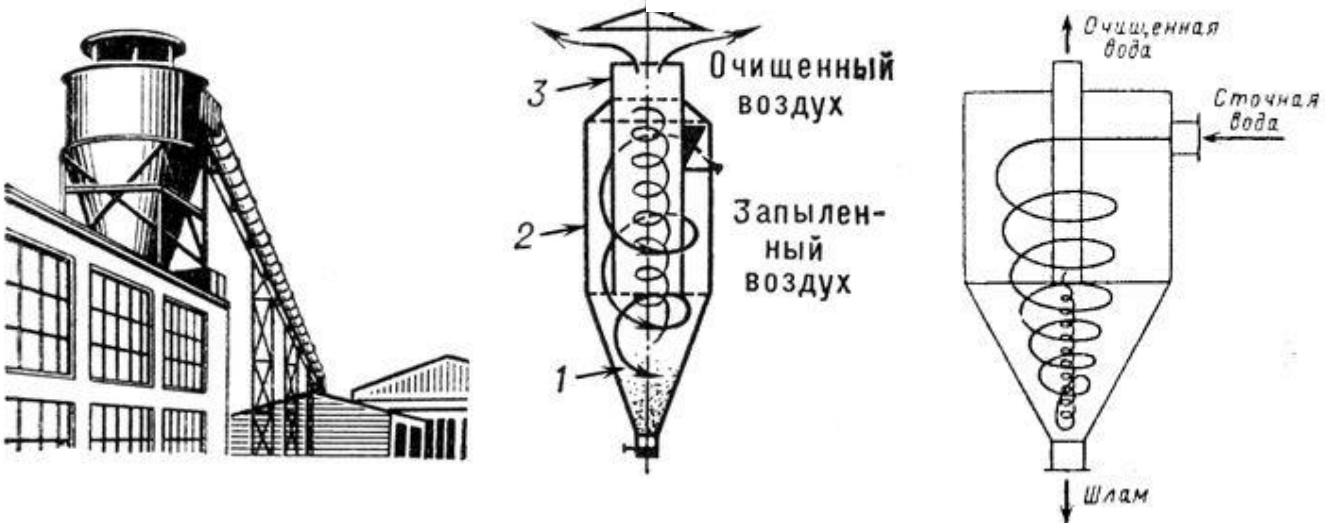


Рисунок 7.4 – Конструкция циклона (гидроциклона)

Гидроциклон состоит из корпуса, а именно цилиндрической верхней части 2 и конического днища 1 а также патрубок вывода очищенного воздуха или жидкости 3. Качество разделения в циклонах зависит от угла конусности. Оптимальным считают угол, равный 10 – 15^0. При таком угле удлиняется коническая часть циклона и путь твердых частиц, следовательно увеличивается время пребывания частиц и качество разделения. Принцип действия: суспензия подается тангенциально (а как это?) в цилиндрическую часть и приобретает вращательное движение. Под действием центробежной силы твердые частицы отбрасываются к стенкам циклона и движутся по спиральной траектории вниз. Очищенная жидкость (воздух) движется во внутреннем спиральном потоке вверх вдоль оси гидроциклона и удаляется через патрубки. Гидроциклоны отличаются простотой конструкции и относительно высокой производительностью.

Рассмотрим отстойную центрифугу периодического действия с ручной выгрузкой осадка, рисунок 6.5.

Барабан насажен на вал и помещен в корпус. Под действием центробежной силы, возникающей при вращении барабана, твердые частицы осаждаются в виде сплошного слоя осадка на стенку барабана, а осветленная жидкость переливается в кожух и удаляется через расположенный внизу патрубок. По окончании процесса осадок выгружается из центрифуги.

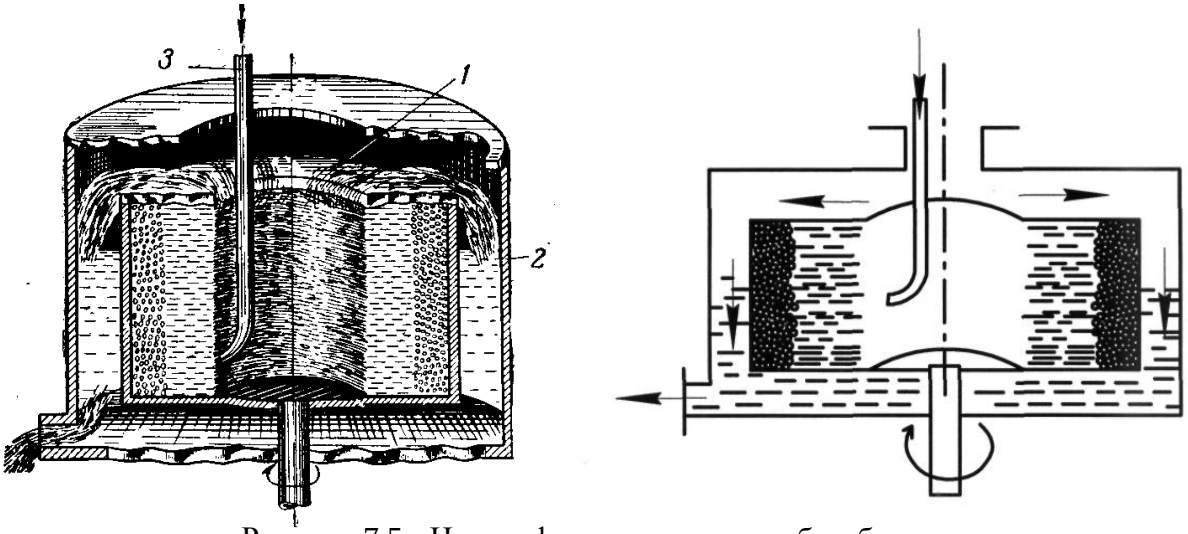


Рисунок 7.5 - Центрифуга со сплошным барабаном:
1 - барабан; 2 - кожух; 3 - труба для подачи суспензии.

Рассмотрим фильтрующую центрифугу, рисунок 7.5.

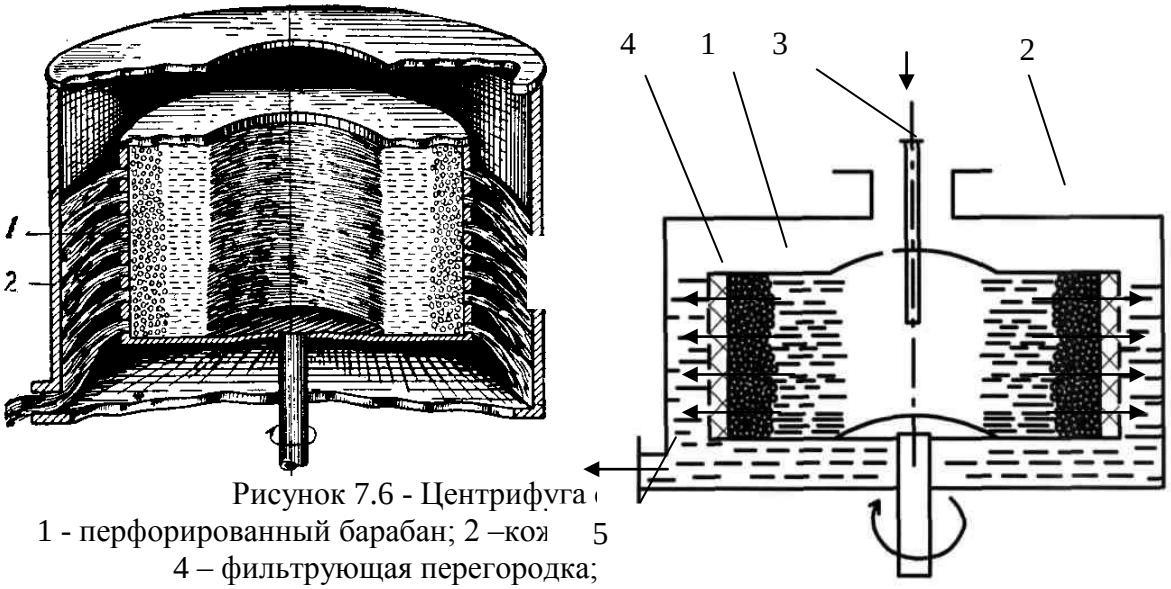


Рисунок 7.6 - Центрифуга
1 - перфорированный барабан; 2 –ко
4 – фильтрующая перегородка;

Центрифугирование по принципу фильтрования чаще всего осуществляется в циклически работающих центрифуг, имеющих непрерывно вращающийся перфорированный ротор, покрытый изнутри фильтрующим материалом. Суспензия поступает в ротор порциями; после заполнения осадком части ротора подача суспензии прекращается, жидкая фаза отжимается, осадок срезается ножом и удаляется; затем снова начинается подача суспензии и цикл повторяется. Как мы уже поняли в пищевой промышленности применяется такой процесс как сепарирование и такое оборудование, как сепаратор. **Сепарирование - это процесс разделение продукта на фракции с различной плотностью во вращающемся сепарирующем устройстве - барабане.** Барабаны сепараторов, рисунок 7.7, снабжены тарельчатыми вставками, которые бывают двух типов: с отверстиями и без отверстий. Тарелки без отверстий вставляют в барабаны сепараторов, предназначенных для выделения из жидкости твердой дисперсной фазы, которая оседает на внутренних стенках барабана, т.е. происходит процесс очистки и сепаратор называется осветлитель.

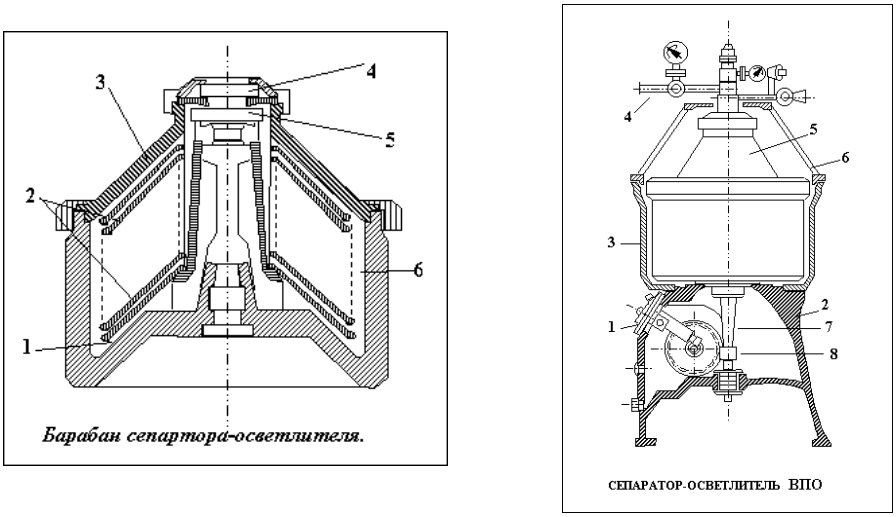


Рисунок 7.7. – Конструкция сепаратора

В барабане продукт течет по каналу 1, попадает в грязевое пространство 6, затем, проходя между тарелками 2, направляется к центру.

Взвешенные частицы осадка продукта при его движении между тарелками под действием центробежной силы отбрасываются на нижние поверхности тарелок, по ним соскальзывают в грязевое пространство 6 и образуют плотный осадочный слой около вертикальной поверхности барабана. Осветленный продукт удаляется из барабана через приёмно-выводное устройство, а осадок - при периодической разборке и промывке барабана. Во избежание соприкосновения с воздухом сепараторы- осветлители могут быть снабжены напорным диском 5, гидрозатвором с диском 4 и крышкой 3.

Порядок работы на сепараторе следующий. Пред пуском его осматривают и проверяют правильность сборки, наличие масла в маслянной ванне станины, исправность тормозов. Затем сепаратор полностью заполняют водой и только после этого пускают в ход. Вода из сепаратора отводится в канализацию. После того как барабан сепаратора набрал необходимую частоту вращения, подачу переключают с воды на продукт.

Как только в контрольном окне покажется продукт, поворотом трехходового крана на выходном трубопроводе соединяют приёмно-выводное устройство сепаратора с продуктопроводом.

Тарелки с отверстиями, расположенными по правильному треугольнику, предназначены для разделения эмульсии на две фракции – тяжелую и легкую, т.е. это сепаратор разделитель.

Жидкость из входного патрубка попадает в тарелкодержатель. Затем она поднимается по каналам, образованными тарелками и растекается по межтарельчатому пространству, где происходит разделение на фракции. Легкая оттесняется к центру, а тяжелая к периферии и обе выходят через специальные отводы - лотки.

В с а м о р а з г р у ж а ю щ и й с я сепаратор (рисунок 7.8), который предназначен для разделения суспензий, содержащих более 1% твердых частиц, суспензия подается в барабан сверху через центральную впускную трубку и распределяется по периферии с помощью распределительного конуса. Твердые частицы как более тяжелая фаза направляются к стенке барабана. Жидкость выходит из барабана в его верхней части после прохождения через дисковую насадку и встроенный

насос с напорным диском. Осадок выгружается из барабана сепаратора через определенные интервалы времени без остановки сепаратора. Выгрузка осадка достигается за счет того, что внутреннее дно барабана может свободно перемещаться по вертикали. Во время сепарирования дно под действием гидравлического давления уплотняющей жидкости прижимается к верхней части барабана, обеспечивая надежную герметизацию. Через определенные интервалы времени автоматически по заданной программе резко снижают давление уплотняющей жидкости, что вызывает перемещение дна барабана вниз. При этом открывается кольцевая щель, через которую под действием центробежной силы выгружаются твердые частицы.

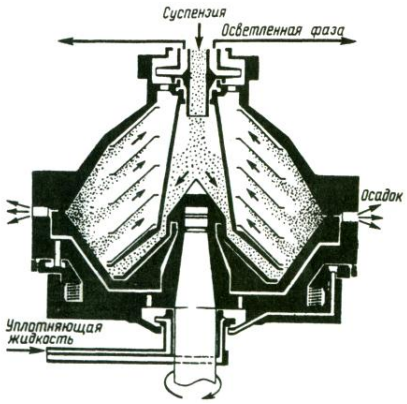


Рисунок 7.8. – Схема работы тарелок саморазгружающегося сепаратора

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое осаждение?
2. Какие неоднородные системы разделяют методом отстаивания?
3. В чем заключается расчет отстойников?
4. Какими методами можно повысить эффективность разделения неоднородных смесей по сравнению с отстаиванием?
5. Что является движущей силой в центрифугах, сепараторах и гидроциклонах?
6. Опишите конструкцию и принцип действия центрифуг.
7. Опишите конструкцию и принцип действия сепаратора-осветлителя.
8. Опишите конструкцию и принцип действия сепаратора-разделителя.
9. От каких параметров зависит скорость осаждения частицы?

Список литературы

Основная

1. Машины и аппараты пищевых производств: в 3 кн. Кн. 1/ред. В.А. Панфилов. - М.: КолосС, 2009. - 610 с.- ISBN 978-5-9532-0509-2
2. Машины и аппараты пищевых производств: в 3 кн. Кн. 3/ред. В.А. Панфилов. - 2-е изд., доп. и перераб. - М.: КолосС, 2009. - 551 с. ISBN 978-5-9532-0754-6
3. Процессы и аппараты пищевых производств: учебник для вузов. В 2-х кн. Кн. 1 / А.Н. Остриков, Ю.В. Красовичкий, А.А. Шевцов; ред. А.Н. Остриков. - СПб.: ГИОРД, 2007. - 704 с. ISBN 978-5-98879-041-9

4. Процессы и аппараты пищевых производств: учебник / Ю.М. Плаксин, Н.Н. Малахов, В.А. Ларин. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: КолосС, 2007. - 760 с. ISBN 978-5-9532-0581-8

Дополнительная

1. Процессы и аппараты пищевой технологии: учебник/Г.Д. Кавецкий, Б.В. Васильев. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Колос, 2000. - 551 с.
2. Процессы и аппараты пищевых производств: учебник / В.И. Горбатюк. - М.: Колос, 1999. - 330 с.

Лекция 8
ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ. ПЕНООБРАЗОВАНИЕ И ПСЕВДООЖИЖЕНИЕ.

1. Пенообразование и взбивание.
2. Псевдоожижение.

1. Пенообразование и взбивание

Пены - это дисперсии газа в жидкости или в твердой фазе. Пенообразование определяется соотношением объемов газа и жидкости, которое называется кратностью пены. В низкократных пенах газовые пузырьки имеют сферическую форму, а пленки между пузырьками очень толстые. Хорошо известным примером таких пен являются взбитые сливки. При более высокой кратности пузырьки газа разделяются тонкими, плоскими жидкими пленками. Область, в которой три пленки встречаются, называется каналом.

Устойчивые и неустойчивые пены

Существуют два типа пен: неустойчивые пены с небольшим временем жизни и стабильные пены. Эти типы пен исследуют различными методами. Неустойчивые пены, как правило, характеризуют методом Бикермана. Газ пропускается через жидкость в колонке с фильтром из плавленного стекла; далее измеряют высоту пены или ее объем в тот момент, когда пена достигнет стационарного состояния. Опыт повторяют при различных скоростях подачи газа. Объем стационарной пены прямо пропорционален скорости подачи газа. Наклон зависимости объема стационарной пены от объемной скорости подачи газа характеризует среднее время жизни пенного пузырька или пенной пленки. Важно, чтобы внизу ячейки в течение всего эксперимента имелся избыток жидкости, поскольку в противном случае объем пены будет лимитироваться количеством доступного раствора.

Стабильные пены характеризуются пенообразующей способностью и устойчивостью. Мерой пенообразующей способности является объем пены сразу после ее образования, а мерой устойчивости - время жизни образовавшейся пены. Растворы многих белков обладают очень низкой пенообразующей способностью, но образуют высокоустойчивые пены, в то время как растворы некоторых ПАВ обнаруживают высокую пенообразующую способность, но плохую устойчивость пен.

Примеры приведены для двух типов сырой нефти стабильных пен. Главные недостатки этого метода заключаются в зависимости от квалификации оператора, вязкости и объема жидкости, а также от размера и формы сосуда, использованного в опыте. Напротив, метод Росса-Майлса является стандартным методом, он позволяет с хорошей воспроизводимостью одновременно оценивать пенообразующую способность и устойчивость пены. Раствор пенообразователя помещают в пеногенератор, объем

мгновенно образующейся пены характеризует пенообразующую способность. Затем измеряют объем пены через 5 или 10 мин, получая таким образом характеристику

устойчивости пены.

Два условия пенообразования

Пены всегда образуются из растворов, однокомпонентные жидкости никогда не вспениваются. Для пенообразования необходимо соблюдение двух условий. Первое условие -один из растворенных компонентов должен быть поверхностно-активным.

Доказательством поверхностной активности компонента является понижение поверхностного натяжения раствора. Поверхностное натяжение большинства органических веществ ниже, чем у воды; поэтому закономерно, что водные растворы с добавками органических компонентов относительно легко образуют пены.

Второе условие заключается в том, что пенные пленки должны обладать поверхностной упругостью, т. е. при растяжении пенной пленки должна возникать сила, стремящаяся вернуть пенную пленку в исходное состояние. Поверхностная упругость Е определяется как увеличение свободной поверхностной энергии, или поверхностного натяжения г, при увеличении площади пленки, т. е. при ее растяжении:

Поверхностная упругость должна проявляться в течение всего времени растяжения и восстановления пленки. Таким образом, при пенообразовании диффузия поверхностно-активного компонента из объема раствора к вновь образующейся поверхности должна происходить довольно медленно. В противном случае адсорбция ПАВ на поверхности приведет к уменьшению поверхностного натяжения, поэтому временное растяжение пенной пленки может стать постоянным, и в результате пленка

теряет упругость и стабильность.

Псевдоожижение

Псевдоожижение — это превращение слоя порошка под влиянием восходящего газового потока в систему, твердые частицы которой находятся во взвешенном состоянии, напоминающую жидкость — псевдоожиженный слой. Из-за внешнего сходства с кипящей жидкостью, псевдоожиженный слой часто называют кипящим слоем.

Простейшую псевдоожиженную систему создают в заполненном слоем порошка вертикальном аппарате, через днище которого равномерно по сечению вводят инертный ожижающий агент (газ).

При его небольшой скорости W порошок неподвижен. С увеличением W высота слоя начинает возрастать (слой расширяется). Когда W достигает критического значения, при котором сила гидравлического сопротивления слоя восходящему потоку становится равной весу твердых частиц, слой приобретает текучесть и переходит в псевдоожиженное состояние.

Если порошок является высокодисперсным, сказывается сила сцепления частиц и наблюдается не равномерное расширение порошка, а образование отдельных агрегатов. Между ними возникают каналы, по которым проходит значительная часть газа. Это агрегативная флуидизация. Так как с увеличением размера частиц

гидродинамические силы возрастают, а молекулярные силы ослабевают, можно ожидать, что при некоторой средней степени дисперсности порошка условия для флуидизации будут оптимальными. И действительно, наиболее равномерная и полная флуидизация наблюдается для порошков, радиус которых близок к 20-25 мкм.

Линейная скорость ожижающего агента, при которой порошок переходит в псевдоожиженное состояние, называется скоростью начала псевдоожижения или его первой критической скоростью W_K. Для мелких частиц (d < 1 мм), для крупных (d ≥ 1 мм). W_K уменьшается с увеличением плотности восходящего потока.

При дальнейшем возрастании W слой разрушается и начинается интенсивный вынос порошка из аппарата. Отвечающая данному состоянию слоя скорость потока называется скоростью уноса (свободного витания) частиц или второй критической скоростью псевдоожижения Wун, превышающей W_K в десятки раз. Если скорость ожижающего агента больше скорости витания самых крупных частиц, слой полностью увлекается потоком. Если после достижения полной флуидизации порошка постепенно уменьшать скорость течения, то при полной остановке тока газа слой порошка останется в расширенном состоянии, для возвращения в первоначальное состояние его надо утрясти. Отсюда следует, что в расширенном слое контакт между частицами сохраняется.

Псевдоожижение газом — наиболее распространенный, способ получения псевдоожиженных систем, хотя существуют и другие способы.

Псевдоожиженный слой применяется очень широко:

• псевдоожижение в проточных системах «газ-твердое тело» часто применяют при нагревании и охлаждении, адсорбции, сушке и т. д.; при этом создаются оптимальные условия взаимодействия фаз;

• многочисленные химические процессы;

• получение гранулированных продуктов.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое пенообразование?
2. Какие показатели применяют для характеристики пены?
3. Что необходимо добавлять для получения устойчивой пены?
4. Чем определяются физико-химические свойства пены?
5. Что такое псевдоожижение?
6. Применение пенообразования и псевдоожижения на производстве.

Лекции 9, 10
ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

1. Общая характеристика тепловых процессов. Движущая сила тепловых процессов.
2. Критерии теплового подобия. Интенсификация тепловых процессов.
3. Классификация аппаратов. Выбор конструкции аппаратов и типа теплоносителя.
4. Основы расчета ТА.

1.Общая характеристика тепловых процессов

1. Под тепловыми процессами и тепловой обработкой понимают нагревание и охлаждение сырья, продуктов, вспомогательных материалов и средств. Можно выделить несколько простых, но широко распространенных на практике тепловых процессов:

- адиабатный – происходящий без теплообмена с окружающей средой;

- изохорный – происходящий при постоянном объеме;
- изобарный – происходящий при постоянном давлении;
- изотермический – происходящий при постоянной температуре;
- изоэнтропийный – при постоянной энтропии;
- изоэнтальпийный – при постоянной энтальпии;
- политропный – при постоянной теплоемкости.

Теплообмен представляет собой перенос энергии в форме теплоты, происходящей между телами, температура которых различна, т.е. теплообменом называется самопроизвольный необратимый процесс переноса теплоты в пространстве с неоднородным температурным полем.

Теплообмен между двумя теплоносителями через разделяющую их твердую стенку называется теплопередачей.

Теплоноситель – движущая среда (газ, пар, жидкость), используемая для переноса теплоты.

Температурное поле – это совокупность значений температур во всех точках пространства в данный момент времени. Если в температурном поле температура является постоянной, поле наз. стационарным, если не постоянным, то нестационарным.

Геометрическое место точек температурного поля с одинаковой температурой называется изотермической поверхностью. Температура изменяется по нормали к изотермической поверхности, причем $t_2 < t_1$.

Предел отношения изменения температуры к расстоянию (Δn) между изотермическими поверхностями по нормали называется температурным градиентом.

$$grad\ t = \lim_{\Delta n \to 0} \left(\frac{\Delta t}{\Delta n}\right) = \frac{\partial t}{\partial n} \qquad (9.1)$$

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

$$dQ = KF\Delta t_{ср} d\tau, \qquad (9.2)$$

которое для установившегося процесса имеет вид

$$Q = KF\Delta t_{ср}, \qquad (9.3)$$

Известны три способа передачи теплоты – теплопроводность, конвекция и тепловое излучение.

Основной закон теплопроводности, установленный Фурье, гласит, что количество теплоты dQ, переданное теплопроводностью, пропорционально градиенту температуры $\partial t/\partial n$, времени $d\tau$ и площади сечения dF, перпендикулярного направлению теплового потока.

$$dQ = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} F d\tau, \qquad (9.4)$$

где λ - коэффициент теплопроводности среды, $Вт/(м \cdot К)$.

Основной закон теплоотдачи – закон Ньютона гласит, что 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 $t_{ст}$ и ядра потока t_f (или наоборот) и продолжительности процесса $d\tau$.

$$dQ = \alpha \left(t_{ст} - t_f \right) F d\tau,$$
$$dQ = \alpha \left(t_f - t_{ст} \right) F d\tau. \qquad (9.5)$$

Движущей силой теплового процесса является разность температур. Тепло распространяется от среды с большей температурой к среде с меньшей. Следует отметить, что при теплопередаче от одного теплоносителя к другому перепад температуры Δt не сохраняет своего постоянного значения вдоль поверхности теплообмена, поэтому пользуются средней разностью температур. Определим эту поверхность.

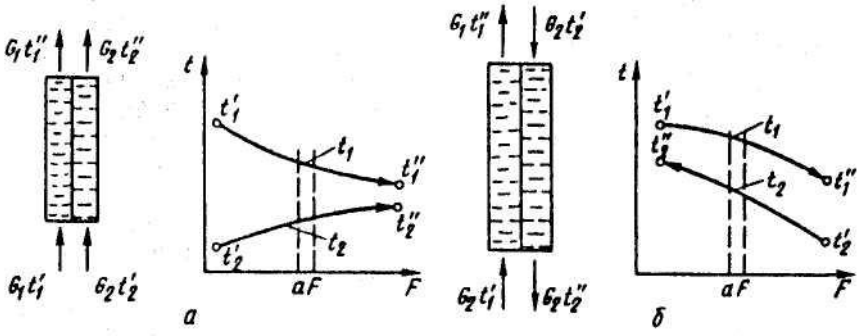


Рисунок 8.1 – Схемы изменения температур теплоносителей:
а – при прямотоке; б – при противотоке

Выделим элемент поверхности dF, на которой происходит указанный процесс теплообмена. Количество тепла в единицу времени на элементе dF можно определить формулой.

$$dQ = K \cdot (t_1'' - t_2'')dF \qquad (9.6)$$

В процессе теплообмена температура первого теплоносителя (ГС) понижается на величину:

$$dt_1' = -\frac{dQ}{G_1 \cdot c_1}, \qquad (9.7)$$

где c_1 – теплоемкость ГС, Дж/кгК, G_1 – масса ГС, кг.

Без учета потерь температура второго теплоносителя (НС) повысится на величину:

$$dt_2' = \frac{dQ}{G_2 c_2}, \qquad (9.8)$$

где c_2 – теплоемкость ГС, Дж/кгК, G_2 – масса ГС, кг.

Вычитая одно из другого двух последних равенств, получаем:

$$d(t_1' - t_2') = -dQ \cdot \left(\frac{1}{G_1 \cdot c_1} + \frac{1}{G_2 \cdot c_2} \right), \qquad (9.9)$$

Сделав подстановку из уравнения (8.6) в уравнение (8.9), и, преобразовав его, получим:

$$d(t_1' - t_2')/(t_1'' - t_2'') = -K \cdot \left(\frac{1}{G_1 \cdot c_1} + \frac{1}{G_2 \cdot c_2} \right) dF \qquad (9.10)$$

Согласно нашему рисунку, общее количество теплоты в единицу времени, переданное от одного теплоносителя и воспринятое вторым на всей поверхности F, имеет следующее выражение.

$$Q = G_1 \cdot c_1 \cdot (t_1' - t_1'') \quad (8.11)$$

$$Q = G_2 \cdot c_2 \cdot (t_2'' - t_2') \quad (8.12)$$

Осуществляем подстановку уравнений (8.11) и (8.12) в уравнение (9.10), получаем

$$d(t_1' - t_2')/(t_1'' - t_2'') = -\frac{K}{Q} \cdot [(t_1' - t_1'') + (t_2'' - t_2')]dF \quad (9.13)$$

Проинтегрировав полученное выражение при условии постоянства коэффициента теплопередачи К, имеем

$$Q = K \cdot F \cdot \frac{(t_1' - t_1'') - (t_2'' - t_2')}{ln\frac{(t_1' - t_2')}{(t_1'' - t_2'')}} \quad (9.14)$$

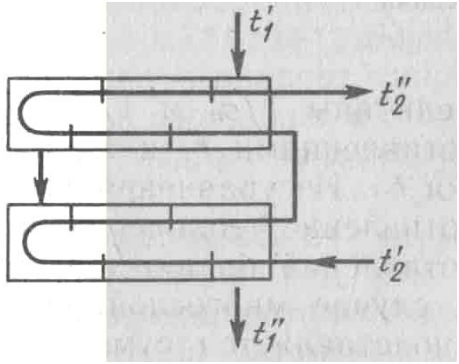
Если в числителе произвести перегруппировку, и, согласно чертежу обозначить $(t_1' - t_1'') = \Delta t_б$, а $(t_2'' - t_2') = \Delta t_м$, то получим

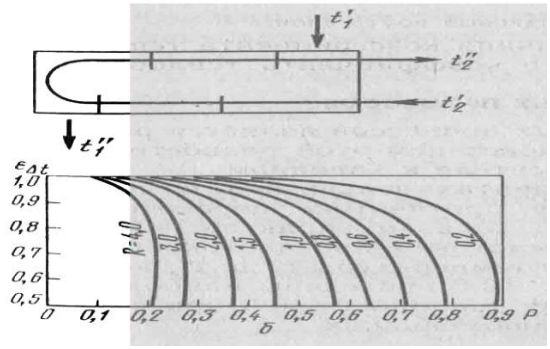
$$Q = K \cdot F \cdot \frac{\Delta t_б - \Delta t_м}{ln\frac{\Delta t_б}{\Delta t_м}}, \quad (9.15)$$

где $\frac{\Delta t_б - \Delta t_м}{ln\frac{\Delta t_б}{\Delta t_м}}$ - среднелогарифмическая разность температур.

Это соотношение справедливо как для прямотока, так и для противотока. При перекрестном токе вводится коэффициент Е, который определяется по соответствующим схемам графикам, рисунок 6.2.

$$P = \frac{t_2'' - t_2'}{t_1' - t_2'}; \quad R = \frac{t_1' - t_1''}{t_2'' - t_2'}$$





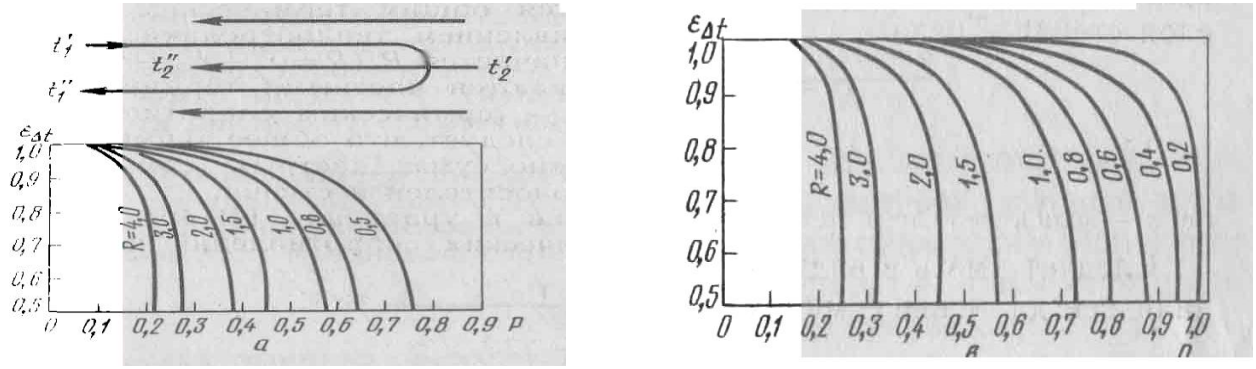


Рисунок 8.2 - Схемы движения теплоносителей при смешанном токе в кожухотрубных теплообменниках:

а) один ход в межтрубном пространстве аппарата и два и более ходов в трубном пространстве; б) один ход в межтрубном пространстве с поперечными перегородками, двумя и более ходов в трубном пространстве; в) два хода в межтрубном пространстве с поперечными перегородками и четырьмя ходами в трубном пространстве.

2. Критерии теплового подобия

Критерий Нуссельта $Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}$,

где α – коэффициент теплоотдачи, $Вт/(м^2 \cdot К)$,

l – линейный размер, м,

λ – коэффициент теплопроводности, $Вт/(м \cdot К)$.

Характеризует интенсивность теплообмена на границе раздела фаз. Необходим для расчета коэффициента теплоотдачи.

Критерий Фурье $Fo = \frac{a \cdot \tau}{l^2}$,

где а – коэффициент температуропроводности, $м^2/с$,

τ – время, с.

Характеризует связь между скоростью изменения температурного поля размерами и физическими характеристиками среды в нестационарных процессах.

Критерий Пекле $Pe = \frac{\omega \cdot l}{a} = Re \cdot Pr$,

где ω – скорость движения среды, участвующей в теплообмене, м/с,

Характеризует отношение количеств тепла, которое распространяется в потоке жидкости конвекцией и теплопроводностью

Критерий Прандтля $Pr = \frac{\nu}{a}$

Характеризует теплофизические величины потока жидкости.

Критерий Грасгофа $Gr = \beta \cdot \frac{g l^3}{\nu^2} \Delta t$,

где β – температурный коэффициент объемного расширения жидкости или газа, $К^{-1}$.

Характеризует гидродинамический поток жидкости в условиях естественной конвекции, которая будет происходить под действием разности плотностей холодного и горячего потока.

Критерий Нуссельта является определяемым, а все остальные критерии определяющие.

$$Nu = f(Fo, Pe, Pr, Re, Gr).$$

Цель интенсификации тепловых процессов заключается в повышении эффективности работы аппаратов и снижении расхода ими тепловой энергии. Задачи интенсификации предусматривают экономию энергии путем оптимизации технологически процессов, а именно интенсификация теплообмена связана с коэффициентом теплоотдачи и термическим сопротивлением стенки.

Основным способами повышения коэффициента теплоотдачи являются:

1. Правильный выбор теплового аппарата.
2. Обеспечение турбулентного режима движения теплообменных сред в аппарате (применяют турбулизирующие вставки, перемешивающие устройства).
3. Замена свободной конвекции на принудительную.
4. Своевременный и полный отвод конденсата из паровых пространств, а также несконденсированных паров.
5. Оптимизация формы и размеров продукта, подвергаемых тепловой обработке.
6. Снижение термического сопротивления стенок аппарата за счет удаления накипи и пригара продукта.

В пищевой промышленности широко распространены тепловые процессы - нагревание и охлаждение жидкостей и газов и конденсация паров, которые проводятся в теплообменных аппаратах (теплообменниках).

3. Классификация аппаратов. Выбор конструкции аппаратов и типа теплоносителя. Основы расчета ТА.

Теплообменными аппаратами называются устройства, предназначенные для передачи тепла от одного теплоносителя к другому для осуществления различных тепловых процессов, например, нагревания, охлаждения, кипения, конденсации или более сложных физико-химических процессов – выпаривания и ректификации.

Из-за разнообразия предъявляемых к теплообменным аппаратам требований, связанных с условиями их эксплуатации, применяют аппараты самых различных конструкций и типов, причем для аппарата каждого типа разработан широкий размерный ряд поверхности теплообмена.

Широкая номенклатура теплообменников по типам, размерам, параметрам и материалам позволяет выбрать для конкретных условий теплообмена аппарат, оптимальный по размерам и материалам.

В качестве прямых источников тепла в химической технологии используют главным образом топочные газы, представляющие собой газообразные продукты сгорания топлива, и электрическую энергию. Вещества, получающие тепло от этих источников и отдающие его через стенку теплообменника нагреваемой среде, носят название **промежуточных теплоносителей**. В пищевой промышленности числу распространенных теплоносителей относятся водяной пар и горячая вода, а также так называемые высокотемпературные теплоносители - перегретая вода, минеральные масла, органические жидкости (и их пары), расплавленные соли, жидкие металлы и их сплавы.

В качестве охлаждающих агентов для охлаждения до обыкновенных температур (10-30^{0}С) применяют в основном воду и воздух.

По основному назначению ТА делят на собственно теплообменники, где тепловой процесс является основным и реакторы, где тепловой процесс является вспомогательным, а основной процесс может быть либо физико-химический либо биохимический.

Все теплообменные аппараты по способу передачи тепла разделяются на две большие группы: ***поверхностные теплообменные аппараты*** и ***аппараты смешения***. В поверхностных аппаратах передача тепла от одного теплоносителя к другому осуществляется с участием твердой стенки. Процесс теплопередачи в смесительных теплообменных аппаратах осуществляется путем непосредственного контакта и смешения жидких и газообразных теплоносителей.

Поверхностные теплообменные аппараты в свою очередь подразделяют на ***рекуперативные*** и ***регенеративные***. В рекуперативных аппаратах тепло от одного теплоносителя к другому передается через разделяющую их стенку из теплопроводного материала. В регенеративных теплообменных аппаратах теплоносители попеременно соприкасаются с одной и той же поверхностью нагрева, которая в один период нагревается, аккумулируя тепло «горячего» теплоносителя, а во второй период охлаждается, отдавая тепло «холодному» теплоносителю.

Рекуперативные теплообменные аппараты классифицируются по следующим признакам:

- по роду теплоносителей в зависимости от их агрегатного состояния: паро-жидкостные; жидкостно-жидкостные; газо-жидкостные; газо-газовые; паро-газовые.
- по конфигурации поверхности теплообмена: трубчатые аппараты с прямыми трубками; спиральные; пластинчатые; змеевиковые.
- по компоновке поверхности нагрева: типа «труба в трубе»; кожухотрубчатые; оросительные аппараты.

Теплообменные аппараты поверхностного типа, кроме того классифицируются по *назначению* (подогреватели, холодильники и т.д.); по *взаимному направлению теплоносителей* (прямоток, противоток, смешанный ток и т.д.); по *материалу поверхности теплообмена*; по *числу ходов* и т.д.

Классификация поверхностных теплообменных аппаратов по отдельным группам, рисунок 9.3

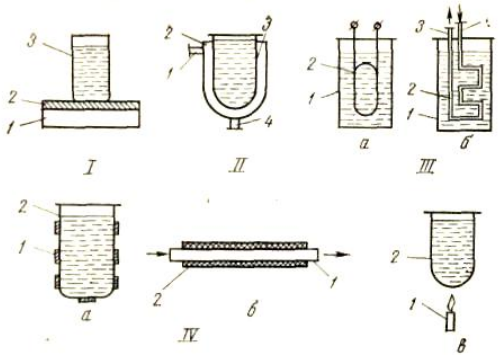


Рисунок 9.3. – Классификация теплообменных аппаратов:
I – с открытой греющей поверхностью: 1 – нагревательный элемент; 2 – греющая поверхность; 3 – нагреваемый объект. II – с рубашкой: 1 – патрубок для ввода греющего агента; 2 – рубашка; 3 – корпус аппарата; 4 – патрубок для выхода. III – с внутрилежащей поверхностью нагрева: *а* – с электронагревателем: 1 – корпус аппарата;

2 – электронагреватель; б – с трубчатым нагревателем: 1 – корпус, 2 - нагреватель, 3, 4 – патрубки для входа и выхода. IV – с поверхностными теплоносителями: а – цилиндрический: 1 – гибкие нагреватели 2 – корпус, б – трубчатый: 1 – труба для нагреваемой жидкости, 2 – гибкие нагреватели; в – с огневым обогревом: 1 – горелка, 2 – корпус.

Кожухотрубчатые теплообменники представляют собой аппараты, выполненные из пучков труб, скрепленных при помощи трубных решеток (досок) и ограниченных кожухами и крышками с патрубками, рисунок 8.4.

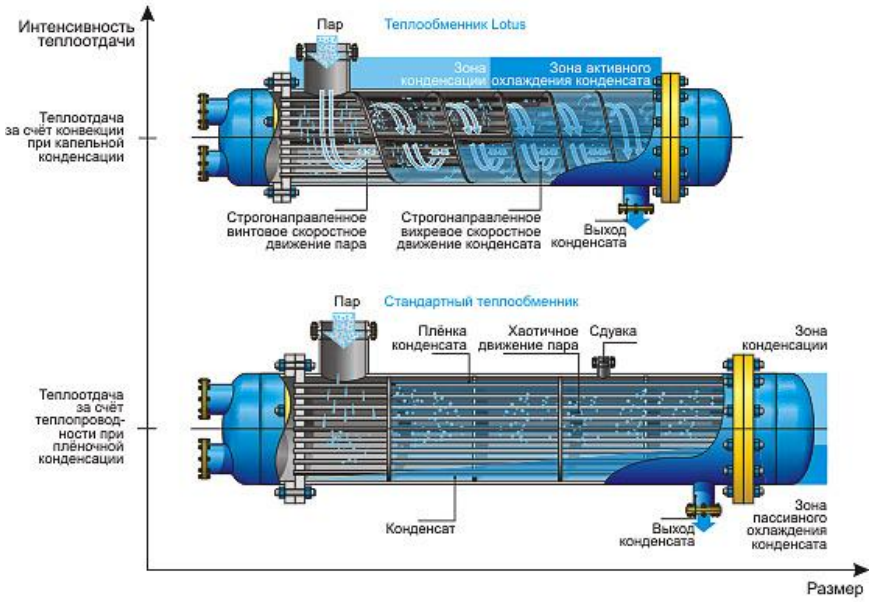


Рисунок 9.4 - Кожухотрубчатые теплообменники

На производстве применяются аппараты одно и многоходовые, рисунок 9.5

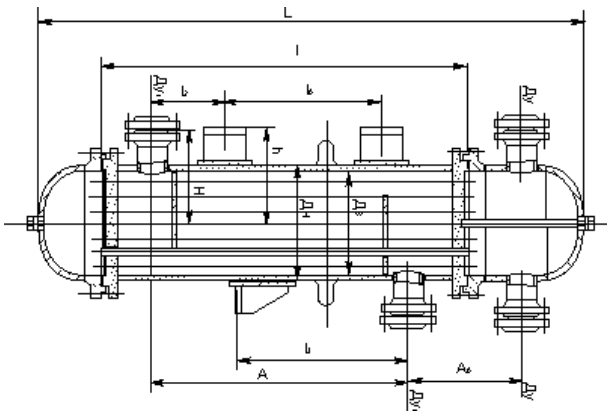


Рисунок 9.5 а. - Аппараты кожухотрубчатые с неподвижными трубными решетками многоходовые

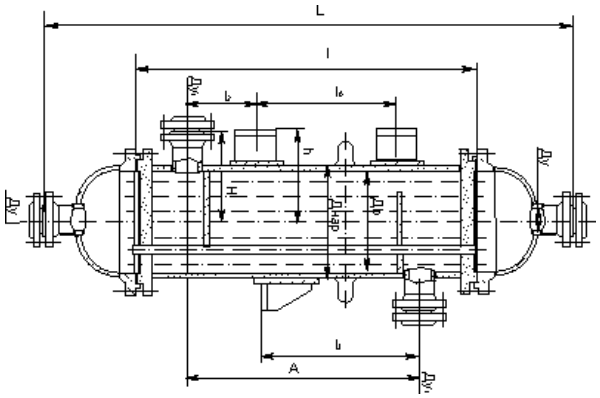


Рисунок 9.5 б. - Аппараты кожухотрубчатые с неподвижными трубными решетками одноходовые

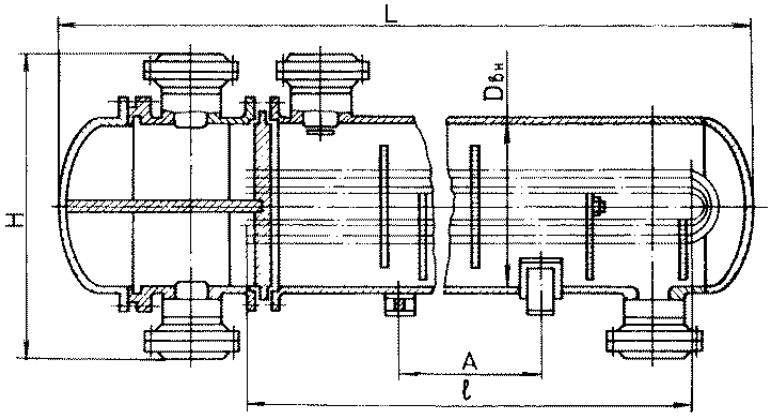


Рисунок 9.5 в. - Аппараты кожухотрубчатые U-образные

Трубное и межтрубное пространства в аппарате разобщены, а каждое из них может быть разделено перегородками на несколько ходов. Перегородки предназначены для увеличения скорости и, следовательно, коэффициента теплоотдачи теплоносителей. Теплообменники этого типа предназначаются для теплообмена: между различными жидкостями, между жидкостями и паром, между жидкостями и газами. Они применяются в случаях, когда требуется большая поверхность теплообмена.

Применяются типовые конструкции кожухотрубчатых теплообменников. При нагреве жидкости паром в большинстве случаев пар вводится в межтрубное пространство, а нагреваемая жидкость протекает по трубкам. В кожухотрубчатых теплообменниках проходное сечение межтрубного пространства в 2-3 раза больше проходного сечения внутри труб. Поэтому при одинаковых расходах теплоносителей, имеющих одинаковое агрегатное состояние, скорости теплоносителя в межтрубном пространстве более низкие и коэффициенты теплоотдачи на поверхности межтрубного пространства невысокие, что снижает коэффициент теплопередачи в аппарате. Теплопередающая поверхность аппаратов может составлять от нескольких сотен квадратных сантиметров до нескольких тысяч квадратных метров. Корпус (кожух) кожухотрубчатого теплообменника представляет собой цилиндр, сваренный из одного или нескольких стальных листов. Кожухи различаются главным образом способом соединения с трубной решеткой и крышками. Толщина стенки

кожуха определяется максимальным давлением рабочей среды и диаметром аппарата, но не делается тоньше 4 мм. К цилиндрическим кромкам кожуха привариваются фланцы для соединения с крышками или днищами. На наружной поверхности кожуха привариваются патрубки и опоры аппарата. Трубки кожухотрубчатых аппаратов изготовляют прямыми или изогнутыми (U-образными), рисунок 8.5 в, диаметром от 12 до 57 мм. Материал трубок выбирается в зависимости от среды, омывающей ее поверхность. Применяются трубки из стали, латуни и из специальных сплавов. Крышки кожухотрубчатых аппаратов имеют форму плоских плит, конусов, сфер, а чаще всего выпуклых или вогнутых эллипсов.

Секционные теплообменники представляют собой разновидность трубчатых аппаратов, состоят из нескольких последовательно соединенных секций, каждая из которых представляет собой кожухотрубчатый теплообменник с малым числом труб и кожухом небольшого диаметра (рисунок 8.6).

Рисунок 9.6 – Секционный теплообменник.

В секционных теплообменниках при одинаковых расходах жидкостей скорости движения теплоносителей в трубах и межтрубном пространстве почти равновелики, что обеспечивает повышенные коэффициенты теплопередачи по сравнению с обычными трубчатыми теплообменниками. Простейшим из этого типа теплообменников является теплообменник "труба в трубе", рисунок 8.7: в наружную трубу вставлена труба меньшего диаметра. Все элементы аппарата соединены сваркой.
Недостатки секционных теплообменников: высокая стоимость единицы поверхности нагрева, так как деление ее на секции вызывает увеличение количества наиболее дорогих элементов аппарата - трубных решеток, фланцевых соединений, переходных камер, компенсаторов и т. д.; значительные гидравлические сопротивления вследствие различных поворотов и переходов вызывают повышенный расход электроэнергии на привод прокачивающего теплоноситель насоса.

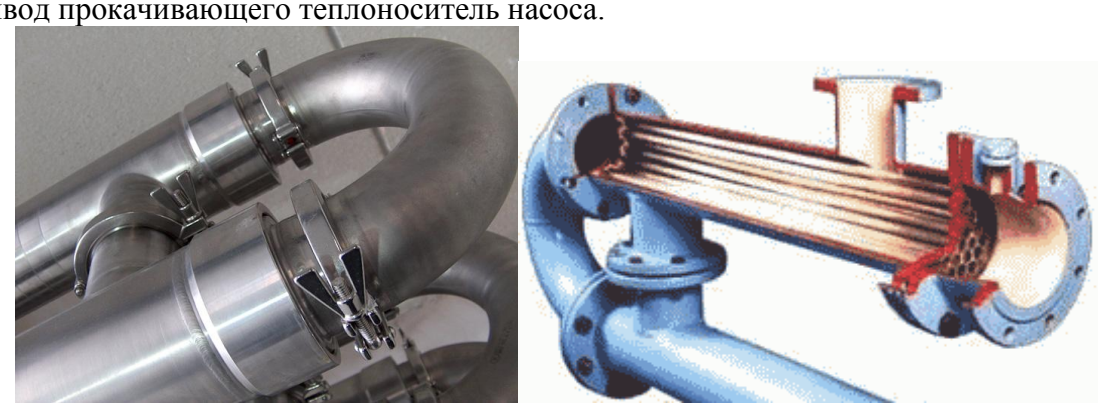


Рисунок 9.7 Аппарат типа «труба в трубе».

Описание работы аппарат типа труба в трубе.

При истечении жидкостей в теплообменнике температура их изменяется: горячая жидкость охлаждается, а холодная нагревается. Характер изменения температуры жидкости, движущейся вдоль поверхности нагрева, зависит от схемы ее движения. В теплообменных аппаратах применяются в основном три схемы движения жидкостей:

- прямоточная, когда горячая и холодная жидкости протекают параллельно;
- противоточная, когда горячая и холодная жидкости протекают в противоположном друг другу направлении;
- перекрестная, когда жидкости протекают в перекрестном направлении.

В аппаратах типа «труба в трубе» организуют прямоток и противоток, рисунок 8.8

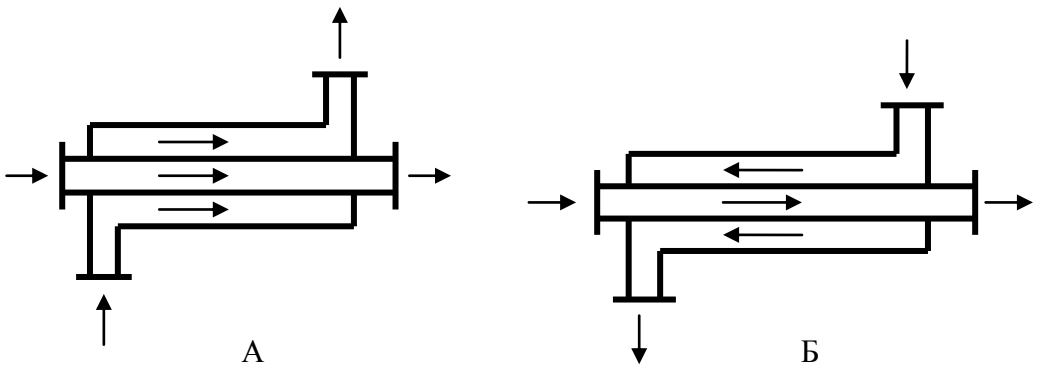


Рисунок 9.8 Схема движения жидкостей в теплообменнике типа «труба в трубе» при прямотоке (А) и противотоке (Б).

Конструкцию ТА следует выбирать, исходя из следующих основных требований, предъявляемых к ТА:

- соответствие аппарата технологическому процессу обработки данного продукта. Это достигается при условии поддержания температуры процесса, обеспечении регулирования температурного режима, соответствии рабочих скоростей продукта минимально необходимой продолжительности пребывания продукта в аппарате, выборе материала аппарата в соответствии с химическими свойствам продукта, соответствии аппарата давлениям рабочих сред;
- высокая эффективность (производительность) и экономичность работы аппарата, связанные с повышением интенсивности теплообмена. Эти условия выполняются при достаточной скорости сред для осуществления турбулентного режима, благоприятном относительном движении рабочих сред (лучше противоток), обеспечении оптимальных условия для отвода конденсата, предотвращении загрязнения либо легкой очистки поверхностей аппарата;
- компактность, малая масса, простота конструкции, удобство монтажа и ремонта аппарата. Здесь оказывают влияние следующие факторы – это конфигурация поверхности, способ размещения и крепление трубок в трубных решетках, наличие и тип перегородок, уплотнений, габаритные размеры аппарата.

В качестве теплоносителей в зависимости от назначения производственных процессов могут применяться самые разнообразные газообразные, жидкие и твердые

вещества. С точки зрения технической и экономической целесообразности их применения теплоносители должны обладать следующими качествами:

1. Иметь достаточно большую теплоту парообразования, плотность и теплоемкость, малую вязкость. При таких характеристиках теплоносителей обеспечивается достаточная интенсивность теплообмена и уменьшаются их массовые и объемные количества, необходимые для заданной тепловой нагрузки теплообменного аппарата. Необходимо также, чтобы теплоносители имели высокие температуры при малых давлениях, что способствует установке относительно небольших поверхностей теплообмена.

2. Иметь необходимую термостойкость и не оказывать неблагоприятного воздействия на материалы аппаратуры. Теплоносители должны быть химически стойкими и неагрессивными даже при достаточно длительном воздействии высоких температур. Желательно, чтобы теплоносители не давали в процессе работы отложений на поверхность теплообмена, так как отложения понижают коэффициент теплоотдачи и теплопроизводительность оборудования.

3. Быть недорогими и достаточно доступными в отечественных ресурсах. Дорогостоящие или малодоступные вещества увеличивают капитальные затраты и эксплуатационные расходы, что иногда приводит к явной нецелесообразности применения их с экономической точки зрения.

При выборе теплоносителей необходимо в каждом отдельном случае детально учитывать их термодинамические и физико-химические свойства, а также технико-экономические показатели. Водяной пар как греющий теплоноситель получил больше распространение вследствие ряда своих достоинств:

1. Высокие коэффициенты теплоотдачи при конденсации водяного пара позволяют получать относительно небольшие поверхности теплообмена.

2. Большое изменение энтальпии при конденсации водяного пара позволяет расходовать малое его весовое количество для передачи сравнительно больших количеств тепла.

3. Постоянная температура конденсации при заданном давлении дает возможность наиболее просто поддерживать постоянный режим и регулировать процесс в аппаратах.

Основным недостатком водяного пара является значительное повышение давления в зависимости от температуры насыщения. Обогрев паром применяет в процессах нагревания, происходящих при умеренных температур (порядка 60-150 °С).

Наиболее употребляемое давление греющего пара в теплообменниках составляет от 0,2 до 1,2 МПа. Для высоких температур теплообменники с паровым обогревом получаются очень тяжелыми и громоздкими по условиям обеспечения прочности, имеют толстые фланцы и стенки весьма дороги и поэтому применяются редко.

Горячая вода получила большое распространение в качестве греющего теплоносителя, особенно в отопительных вентиляционных установках. Подогрев воды осуществляется в специальных водогрейных котлах, производственных технологических агрегатах (например, в печах) или водонагревательных установках ТЭЦ и котельных. Горячую воду как теплоноситель можно транспортировать по трубопроводам на значительные расстояния (на несколько километров). Однако горячая вода, поступающая от тепловых сетей, как греющий теплоноситель производственных теплообменников используется редко, поскольку в течение

отопительного сезона при качественном регулировании отпуска тепла температура ее непостоянна и изменяется от 70 до 150 °С.

Дымовые и топочные газы как греющая среда применяются обычно на месте их получения для непосредственного обогрева промышленных изделий и материалов, если физико-химические характеристики последних не изменяются при загрязнении сажей и золой. Если по условиям эксплуатации загрязнение обрабатываемого материала недопустимо, дымовые газы направляются в рекуперативный теплообменник, где отдают свое тепло воздуху, а последний нагревает обрабатываемый материал.

Достоинством топочных газов является возможность нагрева ими материала до весьма высоких температур, которые требуются иногда по технологическим условиям производства. Но это достоинство не всегда может быть использовано, потому что вследствие трудности регулировки возможны перегрев материала и ухудшение его качества; с другой стороны, по условиям техники безопасности не всегда можно пользоваться огневым обогревом. Высокая температура топочных газов приводит к большим тепловым потерям. Газы, покидающие топку с температурой выше 1000 °С, доходят до потребителя с температурой не выше 700 °С, так как осуществить удовлетворительную термоизоляцию при таком высоком уровне температур достаточно трудно.

Недостатки дымовых и топочных газов как греющей среды:
1. Малая плотность газов влечет за собой необходимость получения больших объемов для обеспечения достаточной теплопроизводительности, а последнее приводит к созданию громоздких трубопроводов.
2. Вследствие малой удельной теплоемкости газов их необходимо подавать в аппараты в большом количестве с высокой температурой; последнее обстоятельство вынуждает применять огнеупорные материалы для трубопроводов. Прокладка таких газопроводов, а также создание запорных и регулирующих приспособлений по тракту течения газа представляют большие трудности.
1. Вследствие низкого коэффициента теплоотдачи со стороны газов теплоиспользующая аппаратура должна иметь большие поверхности нагрева и поэтому получается весьма громоздкой.

4. Основы расчета ТА

Расчет теплообменников содержит тепловой, конструктивный, гидравлический, прочностной и технико-экономический, т.е. задача расчета заключается в определении площади теплообменной поверхности и габаритных размеров аппарата.

Расчет начинается с составления материального и теплового балансов, из которых определяется количество переданной теплоты.

Например, тепловой баланс для нагрева вещества количеством G от $t_н$ до $t_к$ насыщенным паром запишется так:

$$Gc_н t_н + Di'' = Gc_к t_к + Di' + Q_п, \quad (9.16)$$

значит количество теплоты, необходимое для нагрева:

$$Q = G(c_к t_к - c_н t_н) = D(i'' - i') + Q_п \quad (9.17)$$

Из основного уравнения теплопередачи определяем площадь поверхности теплообмена, $м^2$

$$F = \frac{Q}{K\Delta t_{ср}}, \quad (9.18)$$

где Q – количество передаваемой теплоты, определяемое в формуле (2), Дж; К – коэффициент теплопередачи, $Вт/(м^2 \cdot К)$; Δt - разность температур между нагреваемой средой и греющим агентом, °С.

Начальные и конечные температуры заданы условием, следовательно необходимо определить коэффициент теплопередачи К, $Вт/(м^2 \cdot К)$;

$$К = \left(\frac{1}{\alpha_1} + \sum_1^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^{-1}, \quad (9.19)$$

где δ - толщина стенки, м; λ - теплопроводность, $Вт/(м \cdot К)$ (выбираем из таблиц по температуре) α_1 и α_2 - коэффициенты теплоотдачи, $Вт/(м^2 \cdot К)$, определяемые из формулы критерия Нуссельта.

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}, \quad (9.20)$$

В свою очередь критерий Нуссельта определяется в зависимости от режима движения жидкости.

Например, при турбулентном режиме движения

$$Nu = 0{,}23 \cdot Re^{0{,}8} \cdot Pr^{0{,}4}, \quad (9.21)$$

При переходном режиме

$$Nu = 0{,}021 \cdot Re^{0{,}8} \cdot Pr^{0{,}43} \left(\frac{Pr_ж}{Pr_{ст}} \right)^{0{,}25}, \quad (9.22)$$

Если движение проходит в кольцевом пространстве, например в ТА типа труба в трубе, то

$$Nu = 0{,}023 \cdot Re^{0{,}8} \cdot Pr^{0{,}4} \left(\frac{D}{d} \right)^{0{,}45}, \quad (9.23)$$

Вследствие влияния различия в исходных данных общее решение, пригодное для любого теплообменника, отсутствует, поэтому пользуются различными методами приближенного расчета.

Например, находят порядка пяти значений коэффициента теплоотдачи при различной температуре, затем находят плотности теплового потока, строят график нагрузочной характеристики и находят уточненное значение температуры стенки, по которой находят коэффициент теплоотдачи и теплопередачи. Затем находят площадь поверхности теплообмена.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое градиент температур?
2. Что является движущей силой тепловых процессов?
3. Какие критерии теплового подобия вы знаете?
4. Перечислите виды тепловых потоков?
5. Перечислите три способа передачи теплоты?
6. Что такое теплопроводность?

7. Что такое конвекция?
8. Какими законами описываются теплопроводность и конвекция?
9. Какова цель интенсификации тепловых процессов?
10. Перечислите основные способы повышения коэффициента теплоотдачи?
11. Что такое тепловой аппарат?
12. Как классифицируются тепловые аппараты?
13. Опишите конструкцию теплообменного кожухотрубного аппарата
14. Опишите принцип действия кожухотрубного теплообменного аппарата.
15. Опишите конструкцию аппарата типа «труба в трубе»?
16. Перечислите теплоносители, применяемые в пищевой промышленности.
17. Принцип расчета тепловой аппаратуры.

Список литературы

Основная

1. Машины и аппараты пищевых производств: в 3 кн. Кн. 1/ред. В.А. Панфилов. - М.: КолосС, 2009. - 610 с.- ISBN 978-5-9532-0509-2
2. Машины и аппараты пищевых производств: в 3 кн. Кн. 3/ред. В.А. Панфилов. - 2-е изд., доп. и перераб. - М.: КолосС, 2009. - 551 с. ISBN 978-5-9532-0754-6
3. Процессы и аппараты пищевых производств: учебник для вузов. В 2-х кн. Кн. 2 / А.Н. Остриков, Ю.В. Красовичкий, А.А. Шевцов; ред. А.Н. Остриков. - СПб.: ГИОРД, 2007. - 608 с. ISBN 978-5-98879-051-8
4. Процессы и аппараты пищевых производств: учебник / Ю.М. Плаксин, Н.Н. Малахов, В.А. Ларин. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: КолосС, 2007. - 760 с. ISBN 978-5-9532-0581-8

Дополнительная

1. Процессы и аппараты пищевой технологии: учебник/Г.Д. Кавецкий, Б.В. Васильев. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Колос, 2000. - 551 с.
2. Процессы и аппараты пищевых производств: учебник / В.И. Горбатюк. - М.: Колос, 1999. - 330 с.

Лекция 11, 12
ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ. ВЫПАРИВАНИЕ

1. Выпаривание

1.1 Общая характеристика процесса выпаривания. Однокорпусная выпарная установка.

1.2.Многократное выпаривание.

1.3 Выпаривание с применением теплового насоса.

1.4 Выбор выпарных аппаратов в зависимости от области их применения.

2. Специальные тепловые процессы:

2.1 Охлаждение, конденсация, нагревание, кипение.

2.2 Замораживание.

1. Выпаривание

1.1 Общая характеристика процесса выпаривания. Однокорпусная выпарная установка.

Выпариванием называется концентрирование растворов практически нелетучих или малолетучих веществ путем испарения летучего растворителя и отвода

образовавшихся паров. Установки, предназначены как для концентрации томатного сока в томатное пюре, так и для получения других плодовых и овощных концентратов. Для упаривания жиросодержащих стоков. Например, разработанная для маслозавода в г.Венёв (Тульская обл.) установка позволяет повышать концентрацию жиров в сливающейся из нее смеси в 20 раз: с 3000 до 60000 мг/л. Вакуум-выпарная установка может входить в состав различных линий по производству джемов, конфитюров, варенья, детского питания, фруктовых и овощных пюре, т.е. для упаривания овощных, ягодных и фруктовых масс. Выпаривание иногда применяют также для выделения растворителя в чистом виде: при опреснении морской воды выпариванием образующийся из нее водяной пар конденсируют и воду используют для питьевых или технических целей. При выпаривании обычно осуществляется частичное удаление растворителя из всего объема раствора при его температуре кипения. Поэтому выпаривание принципиально отличается от испарения, которое, как известно, происходит с поверхности раствора при любых температурах ниже температуры кипения. В ряде случаев выпаренный раствор подвергают последующей кристаллизации в выпарных аппаратах, специально приспособленных для этих целей. Получение высококонцентрированных растворов, практически сухих и кристаллических продуктов облегчает и удешевляет их перевозку и хранение.

Тепло для выпаривания можно подводить любыми теплоносителями, применяемыми при нагревании. Однако в подавляющем большинстве случаев в качестве греющего агента при выпаривании используют водяной пар, который называют *греющим* или *первичным*.

(Первичным служит либо пар, получаемый из парогенератора, либо отработанный пар, или пар промежуточного отбора паровых турбин).

Пар, образующийся при выпаривании кипящего раствора, называется *вторичным*. Тепло необходимое для выпаривания раствора, обычно подводится через стенку, отделяющую теплоноситель от раствора.

Процессы выпаривания проводят под вакуумом, при повышенном и атмосферном давлениях. Выбор давления, связан со свойствами выпариваемого раствора и возможностью использования тепла вторичного пара.

Выпаривание *под вакуумом* имеет определённые преимущества перед выпариванием при атмосферном давлении, несмотря на то, что теплота испарения раствора несколько возрастает с понижением: давления и соответственно увеличивается расход пара на выпаривание 1 кг растворителя (воды).

При выпаривании под вакуумом становится возможным проводить процесс при более низких температурах, что важно в случае концентрирования растворов веществ, склонных к разложению при повышенных температурах. Кроме того, при разрежении увеличивается полезная разность температур между греющим агентом и раствором, что позволяет уменьшить поверхность нагрева аппарата (при прочих равных условиях). В случае одинаковой полезной разности температур при выпаривании под вакуумом можно использовать греющий агент более низких рабочих параметров (температура и давление). Вследствие этого выпаривание под вакуумом широко применяют для концентрирования высококипящих растворов, например растворов щелочей, а также для концентрирования растворов с использованием теплоносителя (пара) невысоких параметров. Примёнение вакуума дает возможность использовать в качестве греющего агента, кроме первичного пара, вторичный пар самой выпарной установки, что снижает расход первичного греющего пара. Вместе с тем при применении вакуума удорожается выпарная установка, поскольку требуются дополнительные затраты на устройства для

создания вакуума (конденсаторы, ловушки, вакуум-насосы), а также увеличиваются эксплуатационные расходы.

При выпаривании *под давлением выше атмосферного* также можно использовать вторичный пар, как для выпаривания, так и для других нужд, не связанных с процессом выпаривания.

Вторичный пар, отбираемый на сторону, называют *экстрапаром*. Отбор экстрапара при выпаривании под избыточным давлением позволяет лучше использовать тепло, чем при выпаривании под вакуумом. Однако выпаривание под избыточным давлением сопряжено с повышением температуры кипения раствора. Поэтому данный способ применяется лишь для выпаривания термически стойких веществ. Кроме того, для выпаривания под давлением необходимы греющие агенты с более высокой температурой.

При выпаривании *под атмосферным давлением* вторичный пар не используется и обычно удаляется в атмосферу. Такой способ выпаривания является наиболее простым, но наименее экономичным.

Рассмотрим работу однокорпусной выпарной установки, рисунок 11.1, и определим по определению и графику полезную разность температур.

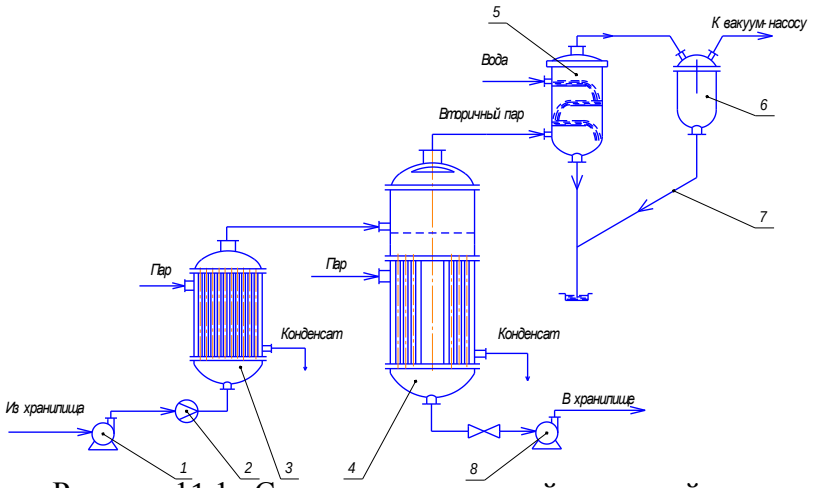


Рисунок 11.1. Схема однокорпусной выпарной установки:
1, 8 – насосы; 2 – расходомер; 3 – теплообменник; 4 – однокорпусной выпарной аппарат; 5 – барометрический конденсатор; 6 – ловушка; 7 – барометрическая труба.

Работа установки: исходный раствор поступает из хранилища с помощью насоса через расходомер в теплообменник, где подогревается практически до температуры кипения. Далее раствор поступает в корпус выпарного аппарата, где сгущается до заданной концентрации. По мере выпаривания непрерывно или периодически вводится свежий раствор до тех пор, пока увариваемая масса заполнит весь аппарат. Упаренный раствор выпускают, и аппарат заполняют новой порцией раствора. Вторичный пар поступает в конденсатор, а несконденсированные пары поступают в ловушку.

Корпус выпарного аппарата, рисунок 11.2, состоит из калоризатора (I), сепаратора (II) и отбойника (III). Наиболее распространенная конструкция выпарного аппарата с вертикальными кипятильными трубками и внутренней циркуляционной трубой. Трубки (длиной 2 – 4м) развальцованы в двух трубных решетках. Межтрубное пространство ограничивается цилиндрическими стенками аппарата и образует паровую камеру, куда подается греющий пар. Из межтрубного пространства внизу камеры отводится конденсат греющего пара. В аппаратах этого типа выпаривание

осуществляется при естественной многократной циркуляции раствора. Основным достоинством таких аппаратов является улучшение теплоотдачи к раствору при его многократной организованной циркуляции в замкнутом контуре, уменьшающей скорость отложения накипи на поверхности труб.

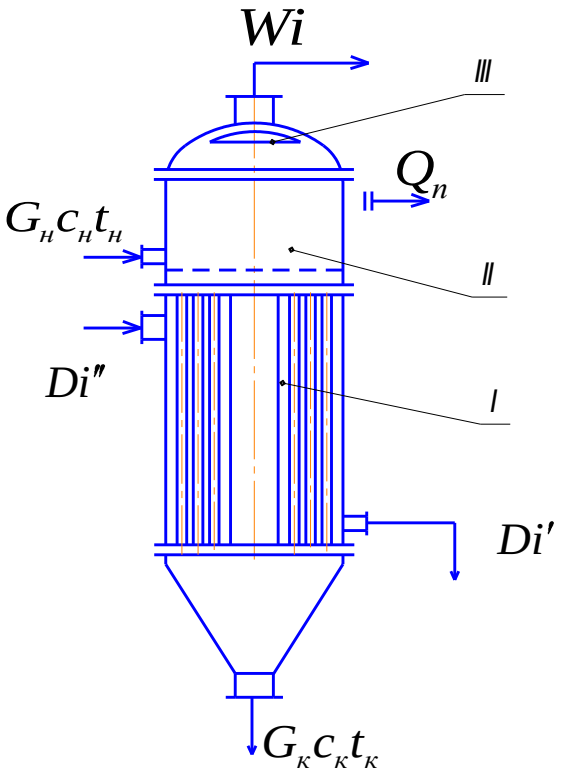


Рисунок 11.2 – Корпус выпарного аппарата.

Кроме того, большинство этих аппаратов компактны. Занимают небольшую производственную площадь, удобны для осмотра и ремонта. Раствор поступает в аппарат над верхней трубной решеткой и опускается по циркуляционной трубе вниз, затем поднимается по кипятильным трубам и на некотором расстоянии от их нижнего края вскипает. Поэтому на большей части длины труб происходит движение вверх парожидкостной смеси, содержание пара в которой возрастает по мере ее движения. Вторичный пар поступает в сепарационное (паровое) пространство, где с помощью отбойника, изменяющего направление движения парового потока, от пара под действием инерционных сил отделяется унесенная им влага. После этого вторичный пар удаляется через штуцер сверху аппарата.

Упаренный раствор удаляется через нижний штуцер конического днища аппарата в качестве промежуточного или конечного продукта.

Циркуляция раствора в аппарате происходит вследствие разности плотностей раствора в циркуляционной трубе и парожидкостной смеси в кипятильных трубах. Возникновение достаточной разности плотностей обусловлено тем, что поверхность теплообмена каждой кипятильной трубы, приходящаяся на единицу объема выпариваемого раствора, значительно больше, чем у циркуляционной трубы, так как поверхность трубы находится в линейной зависимости от ее диаметра, а объем жидкости в трубе пропорционален квадрату ее диаметра. Следовательно, парообразование в кипятильных трубах должно протекать значительно интенсивней,

чем в циркуляционной трубе, а плотность раствора в них будет ниже, чем в этой трубе. В результате обеспечивается естественная циркуляция, улучшающая теплопередачу и препятствующая образованию накипи на поверхности теплообмена.

В аппаратах этой конструкции циркуляционная труба, как и кипятильные трубы, обогревается паром, что снижает разность плотностей раствора и парожидкостной смеси и может приводить к нежелательному парообразованию в самой циркуляционной трубе. Чтобы увеличить разность плотностей используют конструкцию либо с выносной греющей камерой, либо с выносной циркуляционной трубой. Их недостатком является также жесткое крепление кипятильных труб, не допускающее значительной разности тепловых удлинений труб и корпуса аппарата.

Рассмотрим на графике процесс выпаривания, рисунок 11.3.

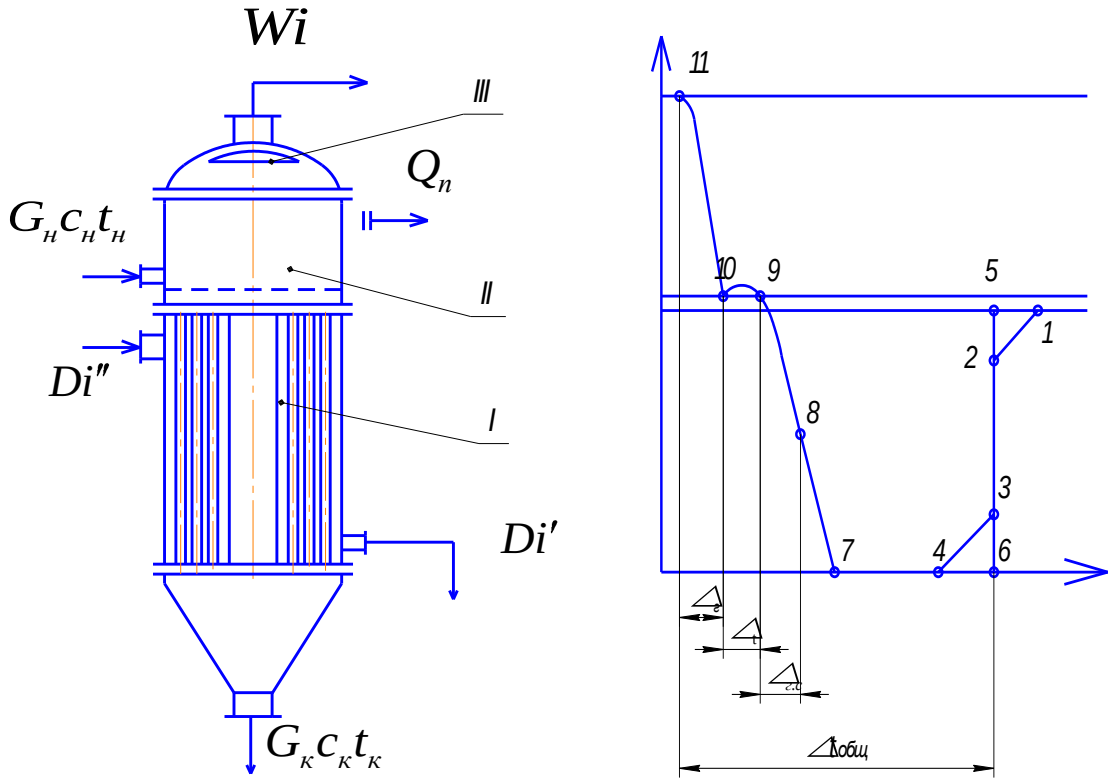


Рисунок 11.3. – График процесса выпаривания

1 – температура перегретого пара, влетающего в калоризатор.

1 – 2 – охлаждение перегретого пара.

2 – 3 – конденсация пара в калоризаторе.

3 – 4 – охлаждение конденсата.

5 – 6 – практически принимаем в расчетах, что пар не перегрет, а конденсат не охлаждается.

7 – раствор начинает нагреваться.

9 – точка кипения раствора на поверхности.

8 – средняя точка кипения раствора – ей соответствует $t_{ср}$.

10 – точка температуры вторичного пара у поверхности кипящего раствора.

11 – точка температуры вторичного пара у входа в конденсатор.

Решающим фактором, определяющим интенсивность выпаривания и производительность выпарного аппарата, является температурный перепад. От этого

перепада зависит площадь поверхности теплопередачи аппарата, которая определяется из основного уравнения теплопередачи $F = Q/K\Delta t$, где Δt - полезная разность температур, которая определяется по общей разности температур и температурным депрессиям.

Общей разностью температур называется разность между температурой греющего пара, подаваемого в греющую камеру выпарного аппарата и температурой вторичного пара в конце паропровода, отводящего пар из выпарного аппарата.

Можно записать и одновременно проследить по графику:

$$\Delta t_{общ} = t_{гр(6-6')} - t_{конд(1-1')}, \quad (11.1)$$

Полезная разность температур:

$$\Delta t = \Delta t_{общ} - \sum\Delta, \quad (11.2)$$

где $\sum\Delta$ - сумма потерь (депрессий), ^{o}C.

$$\sum\Delta = \Delta_t + \Delta_{гс} + \Delta_г, \quad (11.3)$$

где Δ_t - температурная депрессия – разность между температурами кипения раствора и растворителя, $\Delta_t = t_9 - t_{10}$.

$\Delta_{гс}$ - гидростатическая депрессия – разность между температурами кипения раствора посередине греющих трубок и на поверхности р-ра, $\Delta_{гс} = t_9 - t_8$

$\Delta_г$ - гидродинамическая депрессия – учитывает снижение температуры вторичного пара на входе в конденсатор по сравнению с температурой на выходе из выпарного аппарата. Эта потеря невелика и при расчетах принимается $\Delta_г = t_{11} - t_{10} = 1 \div 1{,}5^{o}C$.

Для определения экономичности процесса необходимо определить расход греющего пара. Для этого составим материальный баланс однократного выпаривания:

- по всему веществу

$$G_н = G_к + W \quad (11.4)$$

- по твердому веществу

$$G_н x_н = G_к x_к \quad (11.5)$$

где $G_н$ и $G_к$ - количество поступающего и упаренного раствора, кг/ч;

W – количество выпаренной воды, кг/ч;

$x_н$ и $x_к$ - начальная и конечная концентрации раствора, %

Выразим из (7.5) уравнения количество упаренного раствора $G_к = G_н \frac{x_н}{x_к}$ и подставим в уравнение (7.4) для нахождения количества выпаренной влаги

$$W = G_н\left(1 - \frac{x_н}{x_к}\right), \quad (11.6)$$

Составим тепловой баланс однократного выпаривания

$$G_н c_н t_н + Di'' = G_к c_к t_к + Wi + Di' + Q_п\ . \quad (11.7)$$

Заменим в равенстве (12.6) $G_н$ на $G_к + W$, получим

$$(G_к + W)c_н t_н + Di'' = G_к c_к t_к + Wi + Di' + Q_п, \quad (11.8)$$

раскроем скобки

$$G_к c_н t_н + W c_н t_н + D i'' = G_к c_к t_к + W i + D i' + Q_п, \qquad (11.11)$$

Находим расход греющего пара

$$D = G_к \frac{c_к t_к - c_н t_н}{i'' - i'} + W \frac{i - c_н t_н}{i'' - i'} + \frac{Q_п}{i'' - i'}. \qquad (11.12)$$

Из равенства следует, что расход пара определяется тремя слагаемыми: расходом пара на изменение энтальпии, расходом на собственно выпаривание и расходом пара на компенсацию потерь теплоты в окружающую среду. Первое и третье слагаемые невелики по сравнению со вторым, поэтому имеет место уравнение:

$$D \approx W \frac{i - c_н t_н}{i'' - i'}. \qquad (11.13)$$

Так как $i - c_н t_н \approx i'' - i'$, то это значит, что для испарения 1 кг воды требуется затратить 1,1 – 1,2 кг насыщенного водяного пара. Такой высокий удельный расход пара невыгоден и способ применяется, если он неизбежен по технологическим условиям.

1.2.Многократное выпаривание

Экономичность процесса может быть повышена при использовании вторичного пара. Наиболее целесообразно использовать м*ногокорпусные* выпарные установки, состоящие из нескольких выпарных аппаратов, или корпусов, в которых вторичный пар каждого предыдущего корпуса направляется в качестве греющего в последующий корпус. При этом давление в последовательно соединенных (по ходу выпариваемого раствора) корпусах снижается таким образом, чтобы обеспечить разность температур между вторичным паром из предыдущего корпуса и раствором, кипящим в данном корпусе, т.е. создать, необходимую движущую силу процесса выпаривания. В этих установках первичным паром обогревается только первый корпус. Следовательно, в многокорпусных выпарных установках достигается значительная экономия первичного пара по равнению с однокорпусными установками той же производительности. Т.е удельный расход пара составляет

- для 2-х корпусной установки 0,55 кг на 1 кг выпаренной воды;
- для 3-х корпусной – 0,4 кг;
- для 4-х корпусной – 0,3 кг.

На практике количество корпусов определяется технико-экономическим расчетом, т.е. суммарными затратами на проведение процесса. Суммарные затраты включают капитальные, амортизационные расходы, затраты на ремонт, энергозатраты, затраты на эксплуатацию. Увеличение количества корпусов ведет к увеличению металлоемкости, но понижается ее энергоемкость. Затраты на обслуживание с введением автоматического управления почти не зависят от количества корпусов. Капитальные и амортизационные затраты пропорциональны количеству корпусов. Минимум суммарных затрат на проведение процесса выпаривания определяется на основании результатов расчетов для различного количества корпусов и составления графической зависимости, рисунок 11.4.

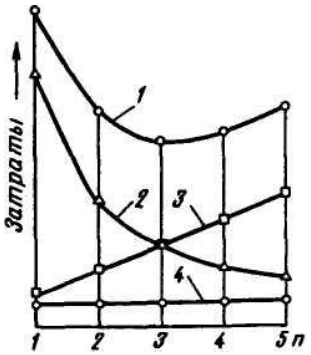


Рисунок 11.4. К определению оптимального количества корпусов выпаривания n:
1 - суммарные затраты; 2 - энергозатраты (по производству пара); *3* - капитальные и амортизационные расходы; *4* - затраты на эксплуатацию

Можно увидеть, что минимальные суммарные затраты, соответствующие минимуму кривой 1 определяют рациональным количеством корпусов 3 или 4.

Многокорпусные установки делятся по взаимному направлению движения греющего пара и выпариваемого раствора на прямоточные и противоточные.

Рассмотрим схему прямоточной многокорпусной установки, рисунок 12.5.

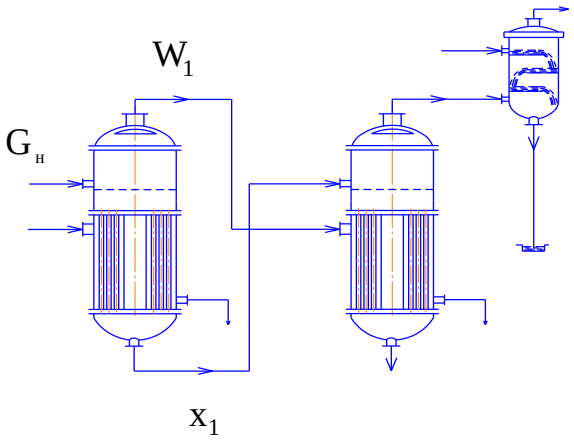


Рисунок 11.5. - Схема прямоточной многокорпусной установки.

Исходный раствор поступает из хранилища в количестве $G_н$, кг/ч с концентрацией $x_н$, % в теплообменник, где подогревается до температуры кипения и поступает в первый корпус выпарной установки. В нем он концентрируется до заданной концентрации x_1, %. При этом из аппарата удаляется W_1, кг/ч вторичного пара. Далее раствор поступает во второй корпус выпарной установки, где концентрируется до концентрации x_2, % (если корпусов больше, то до x_3 и x_4, %). Соответственно из корпусов удаляется вторичного пара в количестве W_2, W_3 и W_4.

Преимущества прямоточной схемы в том, что раствор самотеком перетекает из корпуса с более высоким давлением в корпус с меньшим давлением. **Недостаток** - более низкий средний коэффициент теплопередачи, чем в противоточной установке. В первом корпусе слабый раствор получает теплоту от греющего пара с высокими теплофизическими характеристиками, а в последующий наиболее концентрированный раствор выпаривается вторичным паром наиболее низкого давления.

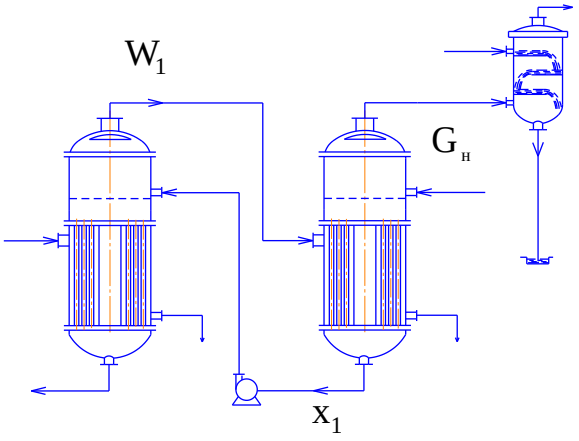


Рисунок 11.6. - Схема противоточной многокорпусной установки.

Из схемы противоточной выпарной установки, рисунок 12.6, видно, что пар вводится в первый корпус, как и в первом случае, а вторичный пар обогревает все последующие корпуса. Выпариваемый раствор вводится в последний корпус и перемещается противотоком вторичному пару к первому корпусу т.е. слабый раствор получает теплоту от вторичного пара, а концентрированный раствор от пара с наибольшими рабочими параметрами.

Достоинство – более высокий коэффициент теплоотдачи.

Недостаток – вследствие того, что давление от n-го корпуса к первому возрастает, для перекачки раствора устанавливают центробежные насосы, что повышает энергозатраты.

1.3 Выпаривание с применением теплового насоса

По технологическим причинам использование многокорпусных выпарных аппаратов иногда может оказаться неприемлемым. Так, например, приходится отказываться от многократного выпаривания тех чувствительных к высоким температурам растворов, для которых температуры кипения в первых корпусах многокорпусных установок слишком высоки и могут вызвать порчу продукта. В подобных и некоторых других случаях возможно и экономически целесообразно использовать для выпаривания однокорпусные выпарные аппараты с тепловым насосом.

С помощью теплового насоса, представляющего собой трансформатор тепла, повышают экономичность работы однокорпусного аппарата, сжимая вторичный пар на выходе аппарата до давления свежего (первичного) пара и направляя его в качестве греющего в нагревательную камеру того же аппарата. Сжатие (вторичного пара производят главным образом в турбокомпрессорах с приводом от электродвигателя или турбины или же в струйных компрессорах (инжекторах). Вследствие компактности, простоты устройства и надежности эксплуатации в качестве тепловых насосов наиболее широко применяют струйные компрессоры, несмотря на их невысокий к.п.д.

Рассмотрим работу выпарного аппарата с турбокомпрессором, рисунок 11.7.

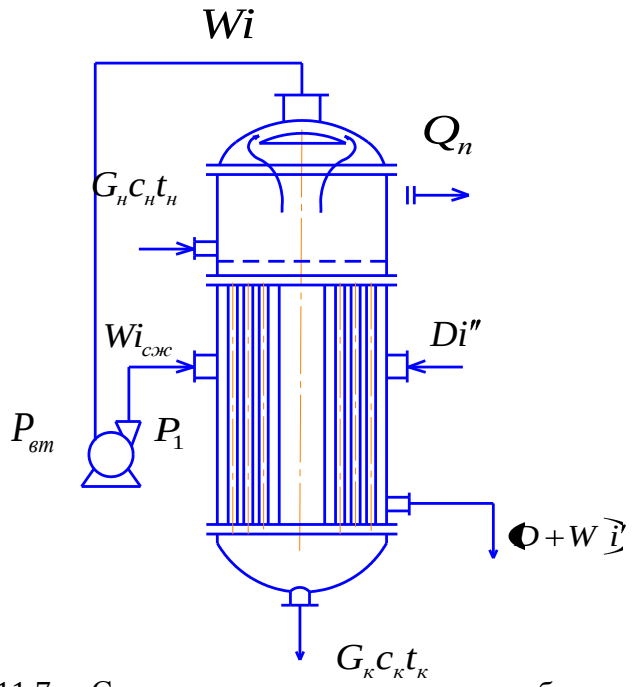


Рисунок 11.7. – Схема выпарного аппарата с турбокомпрессором

Вторичный пар с давлением $p_{вт}$ и энтальпией i, выходящий из выпарного аппарата, засасывается в турбокомпрессор, в котором сжимается до давления p_1. Энтальпия при этом возрастает до $i_{сж}$. Таким образом, за счет сжатия пар приобретает теплоту $\Delta i = i_{сж} - i$. Сжатый пар поступает из турбокомпрессора в греющую камеру выпарного аппарата.

Запишем уравнение теплового баланса процесса.

$$G_н c_н t_н + Di'' + Wi_{сж} = G_к c_к t_к + Wi + (D+W)i' + Q_п \qquad (10.14)$$

Откуда расход греющего пара

$$D = G_к \frac{c_к t_к - c_н t_н}{i'' - i'} + W \frac{i - c_н t_н - i_{сж}}{i'' - i'} + \frac{Q_п}{i'' - i'} \qquad (10.15)$$

где $i_{сж}$ - энтальпия вторичного пара после сжатия в турбокомпрессоре, кДж/кг.

Из сравнения уравнений (10.14) и (12.15) видно, что при выпаривании с тепловым насосом расход греющего пара снижается за счет повышения энтальпии вторичного пара на величину $i_{сж}$.

Однако следует учитывать, что здесь необходимы затраты электроэнергии на приведение в действие турбокомпрессора. А также установка удорожается на стоимость турбокомпрессора.

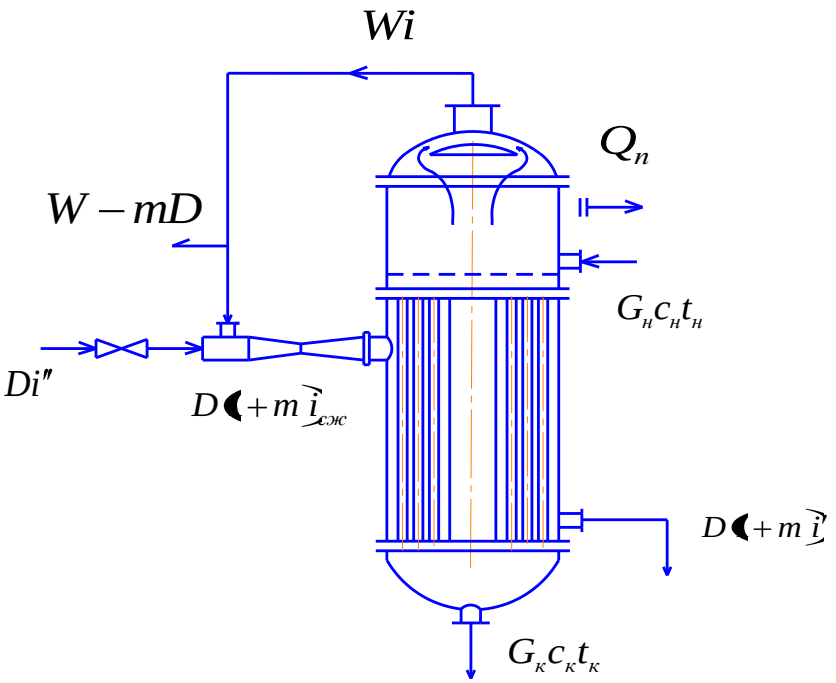


Рисунок 11.8. - Схема выпарного аппарата с инжектором

В установках с паровым инжектором, рисунок 7.8, греющий пара из котельной поступает в паровой инжектор. За счет создания вакуума в инжектор засасывается вторичный пар давлением $p_{вт}$ и энтальпией i, выходящий из выпарного аппарата. Каждая массовая единица греющего пара засасывает m массовых единиц вторичного пара. В результате получают греющий пар в количестве $D(+m)$ с давлением меньшим, чем давление греющего пара, но большим, чем вторичного пара. Часть пара, равная $W - mD$. сбрасывается в атмосферу либо на побочные нужды.

Составим тепловой баланс процесса

$$G_н c_н t_н + D(+m) i_{сж} = G_к c_к t_к + Wi + D(+m) i' + Q_п, \qquad (11.16)$$

откуда расход греющего пара

$$D = G_к \frac{c_к t_к - c_н t_н}{(+m)_{сж} - i'} + W \frac{i - c_н t_н}{(+m)_{сж} - i'} + \frac{Q_п}{(+m)_{сж} - i'}, \qquad (11.17)$$

Сопоставив равенства увидим, что при применении инжектора расход греющего пара уменьшается в (1+m) раз.

Обычно коэффициент инжекции m составляет 0,5 – 1,0.

1.4 Выбор выпарных аппаратов в зависимости от области их применения.

Современные выпарные установки имеют очень большие поверхности нагрева (иногда превышающие 2000 $м^2$ в каждом корпусе) и являются крупными потребителями тепла.

Разнообразные конструкции выпарных аппаратов, применяемые в промышленности, можно классифицировать по типу поверхности нагрева (паровые рубашки, змеевики, трубчатые различных видов) и по ее расположению в пространстве (аппараты с вертикальной, горизонтальной, иногда с наклонной нагревательной камерой), по роду теплоносителя (водяной пар, высокотемпературные теплоносители,

электрический ток| и др.), а также в зависимости от того, движется ли теплоносители снаружи или внутри труб нагревательной камеры.

Конструкция выпарного аппарата должна удовлетворять ряду общих требований, к числу которых относятся: высокая производительность и интенсивность теплопередачи при возможно меньших объеме аппарата и расходе металла на его изготовление, простота устройства, надежность в эксплуатации, легкость очистки поверхности теплообмена, удобство осмотра, ремонта и замены отдельных частей.

Вместе с тем выбор конструкции и материала выпарного аппарата определяется в каждом конкретном случае физико-химическими свойствами выпариваемого раствора (вязкость, температурная депрессия, кристаллизуемость, термическая стойкость, химическая агрессивность и др.).

Как указывалось, высокие коэффициенты теплопередачи и большие производительности достигаются путем увеличения скорости циркуляции раствора. Однако одновременно возрастает расход энергии на выпаривание и уменьшается полезная разность температур, так как при постоянной температуре греющего пара с возрастанием гидравлического сопротивления увеличивается температура кипения раствора. Противоречивое влияние этих факторов должно учитываться при технико-экономическом сравнении аппаратов и выборе оптимальной конструкции.

Для выпаривания растворов небольшой вязкости, не превышающей $\sim 8 \cdot 10^{-3}$ $\text{Па} \cdot \text{с}$, без образования кристаллов чаще всего используются вертикальные выпарные аппараты с многократной естественной циркуляцией. Из них наиболее эффективны аппараты с выносной нагревательной камерой и с выносными необогреваемыми циркуляционными трубами.

Выпаривание некристаллизующихся растворов большой вязкости, достигающей $\sim 0{,}1$ $\text{Па} \cdot \text{с}$, производят в аппаратах с принудительной циркуляцией, реже в прямоточных аппаратах с падающей пленкой или в роторных прямоточных аппаратах.

В роторных прямоточных аппаратах, обеспечиваются благоприятные условия для выпаривания растворов, чувствительных к повышенным температурам.

Аппараты с принудительной циркуляцией широко применяются также для выпаривания кристаллизующихся или вязких растворов. Подобные растворы могут эффективно выпариваться и в аппаратах с вынесенной зоной кипения, работающих при естественной циркуляции. Эти аппараты при выпаривании кристаллизующихся растворов могут конкурировать с выпарными аппаратами с принудительной циркуляцией.

Для сильно пенящихся растворов рекомендуются прямоточные аппараты с поднимающейся пленкой.

2. Специальные тепловые процессы.

2.1 Охлаждение, конденсация, нагревание, кипение

ОХЛАЖДЕНИЕ – процесс понижения температуры материалов путем отвода от них теплоты. Для охлаждения газов, паров и жидкостей до 15–20 ^{o}C в пищевой технологии используют воду и воздух. Для охлаждения продуктов до низких температур используют низкотемпературные хладагенты – холодильные рассолы, фреоны, аммиак, диоксид серы, жидкий азот.

Охлаждение водой осуществляется в теплообменниках, в которых теплоносители разделены стенкой, либо обмениваются теплотой при смешивании. Например, газы охлаждают разбрызгиванием в них воды. Для охлаждения применяется обычная вода с

температурой 15–20 °С либо артезианская температурой 8–12 °С. Часто для охлаждения используют оборотную воду, охлажденную за счёт её испарения в градирнях.

Охлаждение льдом применяется для охлаждения ряда продуктов, например, мороженого, до температуры, близкой к нулю. Лёд нагревается до 0 °С и плавится, отнимая теплоту от охлаждаемого продукта.

Охлаждение воздухом проводится естественном и искусственном способами:

А) При естественном охлаждении горячий продукт охлаждается за счёт потери теплоты в окружающее пространство. Наиболее эффективно естественное охлаждение в зимнее время при низкой температуре воздуха.

Б) Искусственное охлаждение воздухом применяется для охлаждения воды в градирнях, в которых охлаждаемая вода стекает сверху вниз навстречу подаваемому снизу воздуху. При этом охлаждение воздуха происходит не только за счёт теплообмена, но в значительной степени за счёт испарения части жидкости.

Рассмотрим охлаждение водой.

Для процесса представляется важным определение количества затраченной воды. Ее определяют из уравнения теплового баланса.

Если обозначить G – количество продукта, W – количество затраченной воды, $C_п$ и $C_в$ - теплоемкость продукта и воды, $(t^п_н - t^п_к)$ и $(t^в_н - t^в_к)$ - начальная и конечная температуры продукта и воды, то можно записать:

$$GC_п t^п_н + WC_в t^в_н = GC_п t^п_к + WC_в t^в_к + Q_п, \qquad (11.18)$$

где $Q_п$ - потери тепла, принимается $\approx$до 20%.

Выражаем из этого уравнения W:

$$W = \frac{GC_п (t^п_к - t^п_н) + Q_п}{C_в (t^в_н - t^в_к)}, \qquad (11.19)$$

Рассмотрим охлаждение воздухом.

Проводится естественным и искусственным способами. При естественном охлаждении горячий продукт охлаждается за счет потерь теплоты в окружающее пространство.

Искусственное охлаждение применяется (н-р) для охлаждения воды в градирнях, в которых охлаждаемая вода стекает вниз, навстречу подаваемому снизу воздуху.

НАГРЕВАНИЕ – процесс повышения температуры материалов путем подвода к ним теплоты. Широко распространёнными методами нагревания в пищевой технологии являются:

1. Нагревание горячей водой применяется для нагревания и пастеризации пищевых продуктов при температурах ниже 100°С. Для нагревания до температур выше 100°С применяют воду, находящуюся под избыточным давлением. Она имеет высокую теплоёмкость, некоррозиеактивна. Обычно обогрев ведут через разделяющую теплоноситель и продукт стенку аппарата. При нагревании горячей водой или другими жидкими теплоносителями, например, маслом или другими органическими теплоносителями, часто применяются циркуляционный способ обогрева.

а.По этому способу горячая вода циркулирует между нагревателем и теплообменником, в котором он отдаёт теплоту. Циркуляция может быть естественной или принудительной. Естественная циркуляция происходит за счёт разности плотностей горячего и холодного теплоносителей.

Для обогрева теплиц при выращивании огурцов, томатов и др. овощей используется горячая вода, отходящая от заводских теплоиспользующих установок.

b. Обогрев с помощью обогревательных бань представляющих собой аппараты с рубашками. Рубашки нагреваются топочными газами, с помощью электрообогрева или насыщенным водяным паром высокого давления, подаваемым в змеевик.

Из высококипящих органических жидкостей для создания высоких температур применяют минеральные масла (до 250-300^{o}C), тетрахлордифенил (до 300^{o}C), глицерин, кремнийорганические соединения и др.

2. Нагревание насыщенным водяным паром получило широкое распространение. При этом применяют два способа:
   a. Нагревание «глухим» насыщенным паром;
   b. Нагревание «острым» насыщенным паром.

При нагревании «глухим» насыщенным паром теплота от конденсирующегося насыщенного водяного пара к нагреваемому теплоносителю передаётся через разделяющую стенку. Греющий «глухой» пар конденсируется и выводится из парового пространства теплообменника в виде конденсата. При этом температура конденсата принимается равной температуре насыщенного водяного пара. Расход греющего пара определяется из теплового баланса в $(кг/ч)$:

$$GCt_{н} + Di'' = GCt_{к} + Di' + Q_{п}, \qquad (11.20)$$

$$D = \frac{GC(t_{к} - t_{н}) + Q_{п}}{i'' - i'}, \qquad (11.21)$$

где G и D – расход жидкости и пара, $кг/ч$; i'' и i' - энтальпия греющего пара и конденсата, $кДж/кг$.

При нагревании «острым» насыщенным паром водяной пар вводится через барботёр. Нагревание «острым» насыщенным паром применяется в тех случаях, когда допустимо разбавление нагреваемой среды водой.

Расход **«острого»** пара определяют из уравнения теплового баланса:

$$GCt_{н} + Di'' = GCt_{к} + DCt_{к} + Q_{п}, \qquad (11.22)$$

$$D = \frac{GC(t_{к} - t_{н}) + Q_{п}}{i'' - Ct_{к}}, \qquad (11.23)$$

3. Нагревание топочными газами, образующимися при сжигании топлива в специальных печах, например, для обогрева сушилок.
4. Нагревание электрическим током осуществляется в электрических печах сопротивления прямого и косвенного действия.

В печах прямого действия тело нагревается при прохождении через него электрического тока. Нагревание ТВЧ основано на том, что при воздействии на диэлектрик переменного электрического тока молекулы диэлектрика приходят в колебательные движения, при этом часть энергии затрачивается на преодоление трения между молекулами диэлектрика и превращается в теплоту, нагревая тело. Достоинством диэлектрического нагревания являются:

- непосредственные выделения теплоты в нагреваемом теле;
- равномерный быстрый нагрев всей массы материала до требуемой температуры;
- простота регулирования процесса.

В печах косвенного действия теплота выделяется при прохождении электрического тока по нагревательным элементам. Выделяющаяся при этом теплота передаётся материалу тепловым излучением, теплопроводностью и конвекцией.

Для нагревания пищевых продуктов применяется два типа электронагрева: прямой и косвенный.

При прямом нагреве нагреваемый продукт включается последовательно непосредственно в электрическую цепь. Односторонность температурного поля является важным преимуществом электроконтактного метода. Для предотвращения нежелательных явлений электролиза используется переменный ток промышленной частоты. Электроконтактной нагрев используется для размораживания полуфабрикатов, для нагрева водно-мучных смесей и выпечки бескорновых изделий.

Для обработки плодов, ягод и овощей перед прессованием применяется электроплазмолиз. Процесс осуществляется в установках, в которых в зазор между вращающимися валками-электродами пропускают продукт. При этом с помощью тока разрушаются клетки продукта, что улучшает выделение сока прессовании.

На винодельческих предприятиях используют электропастеризационные установки косвенного нагрева. Жидкость, находящаяся в аппарате или прокачиваемая через него, получает теплоту нагревательных элементов. Регулирование температуры производится автоматически. Широкое применение в хлебопекарной и кондитерской промышленности получили печи с электрообогревом, установочная мощность которых достигает 150 кВт.

КОНДЕНСАЦИЯ – это процесс сжижения пара или газа, он широко применяется в технике пищевой промышленности для различных целей: создания разряжения в выпарных аппаратах, использования теплоты конденсации для нагревания жидкостей (в ТА с паровым обогревом).

Конденсацию можно проводить при отводе теплоты от конденсируемых веществ с помощью охлаждающего теплоносителя, отделенного стенкой. Можно при непосредственном смешивании конденсируемых паров с охлаждающим теплоносителем – водой. В первом случае наблюдается поверхностная конденсация, во втором – конденсация смешения.

При конденсации паров на поверхности нагрева образуются отдельные капли или сплошная пленка конденсата, течение которой происходит в зависимости от аппарата (вертикальный, горизонтальный). Пленка составляет основное термическое сопротивление для теплового потока. Поэтому интенсивность теплоотдачи зависит от толщины и режима течения пленки конденсата. Количество теплоты, выделяемое при конденсации, определяется по формуле:

$$Q = D \cdot r, \text{ Дж} \qquad (11.24)$$

где D – количество конденсирующего пара, кг; r – теплота конденсации, $\text{кДж}/\text{кг}$.

Испаре́ние — физический процесс перехода вещества из жидкого состояния в газообразное (пар). Процесс испарения является обратным процессу конденсации (переход из парообразного состояния в жидкое).

Процесс испарения зависит от интенсивности теплового движения молекул: чем быстрее движутся молекулы, тем быстрее происходит испарение. Кроме того, немаловажными факторами, влияющими на процесс испарения, являются скорость внешней (по отношению к веществу) диффузии, а также свойств самого вещества. Проще говоря, при ветре испарение происходит гораздо быстрее. Что же касается свойств вещества, то, к примеру, спирт испаряется гораздо быстрее воды.

Рассмотрим данный процесс на молекулярном уровне: молекулы, обладающие достаточной энергией (скоростью) для преодоления притяжения соседних молекул, вырываются за границы вещества (жидкости). При этом жидкость теряет часть своей энергии (остывает). Например, горячий чай: мы дуем на поверхность жидкости, чтобы остудить его, при этом, мы ускоряем процесс испарения.

Наиболее эффективно испарение жидкостей происходит при кипении. Испарение в пищевой технологии используется для охлаждения и опреснения воды, концентрирования растворов (н-р сахарных). Соответственно используются аппараты: испарители, опреснители, выпарные аппараты.

Расход тепла на испарение:

$$Q = W \cdot r, \text{ Дж} \qquad (11.25)$$

где W – количество испаренной жидкости, кг; r – теплота парообразования $\text{кДж}/\text{кг}$.

Кипе́ние — процесс парообразования внутри жидкости (переход вещества из жидкого в газообразное состояние). Поскольку при кипении изменяется удельный объём вещества, то кипение — это фазовый переход первого рода. Обычно кипение более интенсивно, чем испарение.

Температу́ра кипе́ния, **точка кипения** — температура, при которой происходит кипение жидкости, находящейся под постоянным давлением. Температура кипения соответствует температуре насыщенного пара над плоской поверхностью кипящей жидкости, так как сама жидкость всегда несколько перегрета относительно температуры кипения. С ростом давления температура кипения увеличивается.

При кипении процесс переноса тепла складывается из отдачи тепла жидкости стенкой и передачи тепла внутренней поверхности газового пузыря в виде теплоты испарения. При этом преодолевается термическое сопротивление тонкого пограничного слоя на границе «пузырек газа – жидкость». При медленном **кипении** в жидкости (а точнее, как правило на стенках или на дне сосуда) появляются пузырьки, наполненные паром. Образование пузырьков пара зависит от количества подводимой теплоты, от шероховатости и смачиваемой поверхности. В процессе образования газовых пузырьков, интенсивность процесса возрастает до некоторого предела, равного разности температур между стенкой аппарата и жидкостью, т.е. растет количество тепла, передаваемого жидкости с единицы поверхности в единицу времени. Начинается перемешивание среды, что приводит к росту коэффициента теплоотдачи. Этот процесс и область его существования называется ***ядерным кипением (пузырчатым).***

За счёт интенсивного испарения жидкости внутрь пузырьков, они растут, всплывают, и пар высвобождается в паровую фазу над жидкостью. При этом сама жидкость находится в слегка перегретом состоянии, т. е. температура в толще жидкости превышает номинальную температуру кипения. В обычных условиях эта разница невелика (порядка одного градуса), но факт перегретости можно легко заметить, бросив что-либо в такую воду и наблюдая её резкое вскипание. В лабораторных условиях тщательно очищенные жидкости можно перегреть на десятки градусов.

Возможность перегрева жидкости объясняется тем, что для создания первичного пузырька минимального размера, который уже дальше может расти сам по себе, требуется затратить некоторую энергию (определяемую поверхностным натяжением жидкости). Пока это не достигнуто, мельчайшие пузырьки будут возникать и снова схлопываться под действием сил поверхностного натяжения, и кипения не будет.

При дальнейшем увеличении температуры интенсивность теплового потока возрастает на столько, что пузырьки превращаются в сплошную прослойку газа между стенкой и жидкостью, т.е. если температура дна сосуда значительно превышает

температуру кипения жидкости, то скорость образования пузырей на дне становится столь большой, что они объединяются вместе, образуя сплошную паровую прослойку между дном сосуда и непосредственно самой жидкостью. В этом режиме **плёночного кипения** тепловой поток от нагревателя к жидкости резко падает (паровая плёнка проводит тепло хуже, чем конвекция в жидкости),т.е термическое сопротивление резко возрастает, а коэффициент теплоотдачи резко падает. Это ведет к ухудшению процесса теплоотдачи. и в результате скорость выкипания уменьшается. Режим плёночного кипения можно наблюдать на примере капли воды на раскалённой плите.

На процесс образования пузырьков можно влиять с помощью давления, звуковых волн, ионизации. В частности, именно на принципе вскипания микрообъёмов жидкости от ионизации при прохождении заряженных частиц работает пузырьковая камера.

Интенсивность образования паровых пузырьков зависит от плотности теплового потока, который определяется по формуле:

$$q = Q/S\tau, \qquad (11.26)$$

где τ - время процесса, сек; q – плотность теплового потока, $Вт/м^2$, Q – количество подводимой теплоты, Дж; S – поверхность нагреваемой стенки, $м^2$.

2.1 Процесс замораживания.

Замораживание – искусственное охлаждение до температуры ниже температуры окружающей среды (+4 ^oC до -40 ^oC).

Основой расчетов процесса замораживания является тепловой баланс, причем пренебрегают потерями продукта и тепловыми потерями, т.к. они незначительны.

Уравнение теплового баланса:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q, \text{ Дж} \qquad (11.27)$$

где Q_1 – количество теплоты, отдаваемой продуктом при его охлаждении от начальной до его криоскопической температуры, Дж; Q_2 – количество теплоты, отдаваемой продуктом при фазовом превращении воды (образовании льда), Дж; Q_3 – количество теплоты, отдаваемой продуктом при его охлаждении после замораживания, Дж; Q – количество теплоты, воспринятое хладоносителем, Дж.

Замораживание применяется в следующих случаях:

- замораживание пищевых продуктов с целью обеспечения продолжительного хранения их питательной ценности;
- замораживание смесей с целью получения специфических пищевых продуктов (мороженого, замороженных кремов и др.)
- замораживание пищевых продуктов как подготовительный технологической операции при их сублимационной сушке (лиофилизация);
- замораживание жидких продуктов с целью их концентрации, т.е. осуществление процесса криоконцентрациии фруктовых и овощных соков, виноградного и пивного сусла, уксуса, вина, кофе, получения питьевой воды из морской воды и др.;
- замораживание воды для получения льда.

Замораживание пищевых продуктов в воздушной среде – старый и наиболее распространённый метод, так как воздух является естественной охлаждающей средой. При этом плохие теплофизические свойства воздуха компенсируются высокими рабочими скоростями воздушного потока.

Замораживание в псевдоожиженном слое являются одним из перспективных промышленных методов замораживания пищевых продуктов россыпью. При

замораживании указанным методом продукты, подверженные холодильной обработке, образуют «кипящий» слой при определённой скорости и давлении восходящего воздушного потока. Высокая эффективность аппаратов, основанных на таком принципе работы, обусловлена, прежде всего коэффициентом теплоотдачи материала – от 75 до 186 Вт/(м^{2}К). В аппаратах, работающих полностью на принципе псевдоожижений (флюидизации), воздушный поток пронизывает целиком слой продукта, а также играет роль воздушной подушки для передвижения продукта по камере. Основные преимущества флюизального замораживания: высокая интенсивность и непрерывность технологического процесса и высокое качество замороженного продукта.

Замораживание в жидких хладоносителях и криогенных жидкостях более эффективно, чем замораживание в воздушной среде, так как коэффициент теплоотдачи из продукта в жидкую среду значительно интенсивнее. В качестве хладоносителя чаще всего используются водные растворы различных солей (NaCl, $CaCl_2$ и др.), в которые после их охлаждения до определённой температуры погружают продукты, предназначенные для замораживания.

В аппаратах для замораживания в криогенной жидкости применяют азот и воздух, имеющие низкую нормальную температуру кипения (-195 и -192^{o}С). Промышленное замораживание пищевых продуктов в жидком азоте началась в 60-х годах XX века. Для этих целей используется чистый азот, полученный в качестве отхода на предприятиях, вырабатывающих сжиженный кислород.

Замораживание в жидком азоте проводили методом погружения. Так достигалось сверхбыстрое замораживание, но появились внутренние напряжения и трещины в продуктах, да и с энергетической стороны этот метод невыгоден, так как используется охлаждающий эффект испарения азота. На данном этапе имеются морозильные аппараты, сложной конструкции и больших объёмов, где процесс замораживания идёт поэтапно, при движении продукта по решётчатому конвейеру – производится обдув продукта жидким азотом (до -20 ^{o}С внутри продукта). Процесс происходит быстро, но очень дорогой в 3-4 дороже, чем замораживание в воздушной среде, большой расход азота от 0,8 до 2 кг/кг.

Замораживание в криогенных (фреонных) морозильных аппаратах.

К криогенным морозильным аппаратам относят к аппаратам, работающие на сжиженном воздухе, а также на фреоне.

Фреон многократно циркулирует в системе. Замораживание в жидком фреоне в 1,5-2 раза дороже замораживания в воздухоструйных морозильных аппаратах и следовательно в два раза дешевле замораживания в жидком азоте.

В случае применения аммиака его давление не превышает 1,2–1,4 МПа. Стоимость аммиака относительно невысока. По отношению к чёрным металлам аммиак нейтрален, в присутствии влаги активно действует на медь и её сплавы, которые нельзя применять в аммиачных машинах. Однако аммиак имеет два существенных недостатка. Он взрывоопасен и оказывает вредное влияние на здоровье человека. Поэтому при эксплуатации аммиачных машин следует соблюдать правила охраны труда.

Фреон – 12 (-29,8 ^{o}С) и фреон – 22 (-40,8 ^{o}С) – холодильные агенты, которые безвредны, не имеют запаха и невзрывоопасны. Фреон – 12 является одним из основных холодильных агентов для крупных, средних и малых холодильных установок с поршневыми компрессорами. Однако при температуре свыше 400 ^{o}С он разлагается с образованием вредных соединений. Поэтому применение открытого пламени в помещении с фреоновой холодильной установкой нежелательно. Фреон – 12 весьма текуч и проникает через малейшие неплотности в соединениях, и даже поры металла.

Фреон – 22 имеет те же свойства, но установки работающие на нём значительно компактней.

Эффективность замораживания зависит от формы и размеров продукта. Они влияют на продолжительность, которая обуславливает качество замораживания. Чем быстрее происходит замораживание, тем больше сохраняются первоначальные свойства и выше качество размороженного продукта.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое выпаривание?
2. Какие виды выпаривания вы можете назвать?
3. Опишите работу однокорпусной выпарной установки.
4. Чем отличается работа противоточной и прямоточной многокорпусной выпарной установки?
5. Какое количество корпусов рационально для выпарной установки?
6. Напишите формулу расхода греющего пара в выпарной установке.
7. Какова мотивация использования выпарной установки с тепловыми насосами?
8. Перечислите виды температурных депрессий в выпарной установке.
9. Что такое общая разность температур?
10. Какие методы нагревания применяют в пищевых производствах?
11. Когда можно применять нагревание острым паром?
12. Какие хладагенты используют для охлаждения?
13. Что такое кипение?
14. Какие две стадии кипения вы знаете?
15. Перечислите виды замораживания.
16. Какие хладогенты для замораживания применяются в пищевой промышленности?

Список литературы

Основная

1. Машины и аппараты пищевых производств: в 3 кн. Кн. 1/ред. В.А. Панфилов. - М.: КолосС, 2009. - 610 с.- ISBN 978-5-9532-0509-2
2. Машины и аппараты пищевых производств: в 3 кн. Кн. 3/ред. В.А. Панфилов. - 2-е изд., доп. и перераб. - М.: КолосС, 2009. - 551 с. ISBN 978-5-9532-0754-6
3. Процессы и аппараты пищевых производств: учебник для вузов. В 2-х кн. Кн. 2 / А.Н. Остриков, Ю.В. Красовичкий, А.А. Шевцов; ред. А.Н. Остриков. - СПб.: ГИОРД, 2007. - 608 с. ISBN 978-5-98879-051-8
4. Процессы и аппараты пищевых производств: учебник / Ю.М. Плаксин, Н.Н. Малахов, В.А. Ларин. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: КолосС, 2007. - 760 с. ISBN 978-5-9532-0581-8

Дополнительная

1. Процессы и аппараты пищевой технологии: учебник/Г.Д. Кавецкий, Б.В. Васильев. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Колос, 2000. - 551 с.
2. Процессы и аппараты пищевых производств: учебник / В.И. Горбатюк. - М.: Колос, 1999. - 330 с.

Лекция 13
МАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ

1. Общая характеристика массообменных процессов.
2. Механизм массопередачи. Массоотдача, массопередача, массопроводность
3. Аппараты для ведения процессов массопередачи.

1. Общая характеристика массообменных процессов.

1. Массообменные процессы – такие технологические процессы, скорость протекания которых определяется скоростью переноса вещества (массы) из одной фазы в другую конвективной и молекулярной диффузией. Движущей силой массообменных процессов является разность концентраций распределяемого вещества во взаимодействующих фазах.

Массообменные процессы классифицируют по трем основным признакам: агрегатному состоянию вещества, способу контакта фаз и характеру их взаимодействия.

Перенос распределяемого вещества происходит всегда из фазы, в которой его содержание выше равновесного, в фазу, в которой концентрация этого вещества ниже равновесной.

Массообменные процессы широко используются в промышленности:

-для разделения жидких и газовых гомогенных смесей,

- для их концентрирования,

-для защиты окружающей природной среды (прежде всего для очистки сточных вод и отходящих газов).

Классификация и общая характеристика. Наибольшее распространение получили следующие массообменные процессы: абсорбция, перегонка и ректификация, экстракция (жидкостная), адсорбция, ионный обмен, сушка, растворение и экстрагирование из твердых тел, кристаллизация, мембранные процессы.

Во всех перечисленных выше процессах общим является переход вещества (или веществ) из одной фазы в другую.

2. Массоотдача, массопередача, массопроводность

Процесс перехода вещества (или нескольких веществ) из одной фазы в другую в направлении достижения равновесия называют массопередачей.

Перенос вещества внутри фазы - из фазы к границе раздела фаз или наоборот - от границы раздела в фазу - называют массоотдачей (по аналогии с процессом переноса теплоты внутри фазы - теплоотдачей).

Процессы массопередачи обычно обратимы. Причем направление перехода вещества определяется концентрациями вещества в фазах и условиями равновесия.

Наибольшее распространение получили рассмотренные ниже массообменные процессы.

1. *Абсорбция*- избирательное поглощение газов или паров жидким поглотителем. Этот процесс представляет собой переход вещества из газовой (или паровой) фазы в жидкую. Наиболее широко используется для разделения технологических газов и очистки газовых выбросов.

Процесс, обратный абсорбции, т. е. выделение растворенного газа из жидкости, называют *Десорбцией.*

2. *Перегонка* и *Ректификация* - разделение жидких гомогенных смесей на компоненты при взаимодействии потоков жидкости и пара, полученного испарением разделяемой смеси. Этот процесс представляет собой *Переход компонентов из жидкой фазы в паровую и из паровой в жидкую.* Процесс ректификации используется для разделения жидких смесей на составляющие их компоненты, получения сверхчистых жидкостей и для других целей.
3. *Экстракция (жидкостная)*- извлечение растворенного в одной жидкости вещества другой жидкостью, практически не смешивающейся или частично смешивающейся с первой. Этот процесс представляет собой *Переход извлекаемого вещества из одной жидкой фазы в другую.* Процесс применяют для извлечения растворенного вещества или группы веществ сравнительно невысоких концентраций.
4. Ад*сорбция* - избирательное поглощение газов, паров или растворенных в жидкости веществ твердым поглотителем, способным поглощать одно или несколько веществ из смеси. Этот процесс представляет собой *Переход веществ из газовой, паровой или жидкой 1шзы в твердую.* Адсорбцию применяют для извлечения того или иного вещества (или веществ) достаточно низкой концентрации из six смеси. Процесс, обратный адсорбции, т. е. выделение сорбированного вещества из твердого поглотителя, называют *Десорбцией.*
5. *Ионный обмен* - избирательное извлечение ионов из растворов электролитов. Этот процесс представляет собой *Переход извлекаемого вещества из жидкой фазы в твердую.* Процесс применяют для извлечения веществ из растворов, в которых эти вещества находятся при низких концентрациях.
6. *Сушка* - удаление влаги из твердых влажных материалов, ц основном путем ее испарения. Этот процесс представляет собой *Переход влаги из твердого влажного материала в газовую или паровую фазы.* Сушку широко применяют в технике для пред-варительного обезвоживания перерабатываемых веществ или обезвоживания готового продукта.
7. *Растворение и экстрагирование из твердых тел - это процессы перехода твердой фазы в жидкую* (растворитель). Извлечение на основе избирательной растворимости какого-либо вещества (или веществ) из твердого пористого материала называют *Экстракцией из твердого материала, или выщелачиванием.* Применяют ее для извлечения ценных или токсичных компонентов из твердых материалов.
8. *Кристаллизация-выделение* твердой фазы в виде кристаллов из растворов или расплавов. Этот процесс представляет собой *Переход вещества из жидкой фазы в твердую.* Применяется, в частности, для получения веществ повышенной чистоты.
9. *Мембранные процессы* - избирательное извлечение компонентов смеси или их концентрирование с помощью полупроницаемой перегородки-мембраны. Эти процессы представляют собой *переход вещества (или веществ) из одной фазы в другую через разделяющую их мембрану.* Применяются для разделения газовых и жидких смесей, очистки сточных вод и газовых выбросов.

Таким образом, во всех перечисленных выше процессах общим является переход вещества (или веществ) из одной фазы в другую. *Процесс перехода вещества (или нескольких веществ) из одной фазы в другую в направлении достижения равновесия называют массопередачей.* В отличие от теплопередачи, которая происходит обычно через стенку, массопередача осуществляется, как правило, при непосредственном соприкосновении фаз (за исключением мембранных процессов). При этом граница соприкосновения-т. е. поверхность контакта фаз-может быть подвижной

(система газ-жидкость, пар-жидкость, жидкость-жидкость) или неподвижной (газ-твердое тело, пар-твердое тело, жидкость-твердое тело).

Перенос вещества внутри фазы - из фазы к границе раздела фаз или наоборот - от границы раздела в фазу - называют массоотдачей (по аналогии с процессом переноса теплоты внутри фазы-теплоотдачей).

Процессы массопередачи обычно обратимы. Причем направление перехода вещества определяется концентрациями вещества в фазах и условиями равновесия.

Процесс перехода вещества из одной фазы в другую в изолированной замкнутой системе, состоящей из двух или большего числа фаз, возникает самопроизвольно и протекает до тех пор, пока между фазами при данных условиях температуры и давления не установится подвижное фазовое равновесие. При этом в единицу времени из первой фазы во вторую переходит столько же молекул, сколько в первую из второй. Если теперь количество распределяемого вещества увеличить (например, в фазе *Фу)* на *П* молекул, то распределяемое вещество будет переходить из фазы *Фу* в фазу *Ф.* Причем скорость перехода будет определяться не общим числом молекул *(mA-n)* вещества М, находящегося в фазе *Фу,* а числом молекул, избыточным по отношению к равновесному (т). Так как концентрация пропорциональна числу молекул, то скорость перехода распределяемого вещества из одной фазы в другую пропорциональна разности между фактической (или рабочей) концентрацией распределяемого вещества в данной фазе *(m+n)* и равновесной (w). А это означает, что чем больше такая разница, тем больше (при всех прочих равных условиях) перейдет вещества М из одной фазы в другую. Если эта разница отрицательна, то вещество М переходит из фазы *Ф* в фазу *Фу* (т. е. процесс пойдет в обратном направлении).

Таким образом, знание равновесных концентраций распределяемого вещества позволяет определить направление процесса-из какой фазы в какую будет переходить вещество М - и в определенной степени-скорость процесса.

Как отмечалось выше, массообменные процессы протекают лишь при нарушении фазового равновесия. Только при этом условии распределяемое вещество переходит из одной фазы в другую. При этом различают два вида переноса вещества - *Молекулярный и конвективный.*

В неподвижной среде распределяемое вещество переходит из внутренних слоев данной (первой) фазы к поверхности раздела фаз и, пройдя ее, распределяется по всему объему другой фазы, находящейся в контакте с первой. Такой переход массы вещества из одной фазы в другую называют *Молекулярной диффузией.* Она является следствием теплового движения молекул (ионов, атомов), которому оказывают сопротивление силы внутреннего трения.

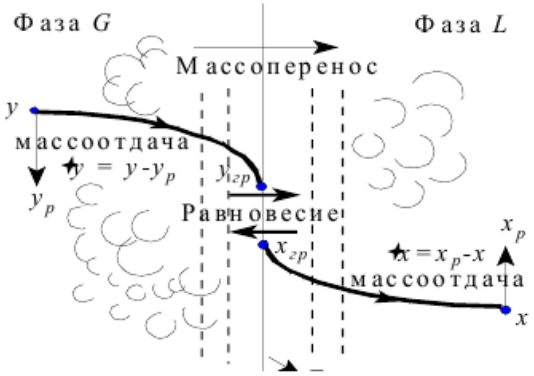


Рисунок.13. 1 Схема массообмена между фракциями.

Обозначим первую фазу G, вторую L, а распределяемое вещество M. Пусть распределяемое вещество находится первоначально только в фазе G и имеет концентрации y. В фазе L в начальный момент распределяемое вещество отсутствует, т.е. концентрация его в этой фазе x = 0. Если фазы G и L привести в соприкосновение друг с другом, начинается переход распределяемого вещества из фазы G в фазу L, и с появлением вещества M в фазе L начинается обратный переход его из фазы L в фазу G. Со временем скорости перехода вещества из фазы G в фазу L и обратно станут одинаковыми и наступит состояние равновесия (рис.12.1). При этом устанавливается определенная зависимость между концентрациями распределяемого вещества в обеих фазах: любой концентрации x этого вещества в фазе L соответствует равновесная концентрация его y_p в фазе G, т.е. $y_p = f(x)$.

3. Аппараты для ведения процессов массопередачи.

К оборудованию для массообменных процессов относятся абсорбционные и ректификационные колонны, экстракционные аппараты, адсорберы, ионообменные аппараты, аппараты для баромембранных и диффузионных процессов, сушилки, аппараты для растворения и выщелачивания и др. Массообменные аппараты для систем газ (пар) – жидкость (процессы абсорбции, дистилляции, ректификации и др.) подразделяются на три группы в зависимости от способа создания поверхности фазового контакта. В аппаратах первой группы поверхностью фазового контакта служит поверхность жидкости, растекающейся по спец. насадке; в аппаратах второй группы поверхность фазового контакта создаётся потоками газа (пара) в жидкости, в аппаратах третьей группы – путём разбрызгивания жидкости.

К первой группе относятся насадочные и плёночные аппараты. Насадочные аппараты представляют собой колонные аппараты (т. е. аппараты, выполненные в виде вертикального цилиндра большой высоты и сравнительно малого диаметра), заполненные насадками – твёрдыми телами разл. формы и размера (кольца Рашига, кольца Палля, сёдла Берля, пропеллерные и мн. другие), которые предназначены для создания развитой поверхности контакта между взаимодействующими потоками. Жидкость тонкой плёнкой покрывает насадки и стекает по ним. Основные. требования к насадке: большая площадь поверхности в единице объёма, хорошая смачиваемость орошающей жидкостью, малое гидравлическое сопротивление газовому потоку, равномерное распределение орошающей жидкости, высокая механическая прочность, химическая стойкость к обрабатываемым средам. Насадочные аппараты просты по устройству, имеют высокие удельную поверхность контакта фаз и коэффициенты массопередачи. Плёночные аппараты могут быть с листовыми (плоскопараллельными) вертикально расположенными насадками (жидкость распределяется по поверхности насадки), в некоторых случаях – с насадками в виде трубок, по внутренние поверхности которых распределяется жидкость. Газ (пар) подаётся противотоком снизу вверх вдоль поверхности плёнки. В ряде случаев при высокой скорости газа (пара) возникает восходящий поток жидкости в плёнке (прямоток). Плёночные аппараты характеризуются высокими коэффициентами массопередачи и низким гидравлическим сопротивлением.

Ко второй группе относятся аппараты, в которых контакт между жидкостью и газом (паром) осуществляется в результате дробления газа (пара) на струи и пузырьки при его барботировании через слой жидкости. Основным оборудованием являются тарельчатые аппараты – колонные аппараты с тарельчатыми контактными устройствами (провальными, колпачковыми, ситчатыми, клапанными, струйными, с двумя зонами контакта и др.). Др. тип аппаратов этой группы – пенные аппараты; в аппаратах этой

конструкции пузырьки газа не свободно всплывают в слое жидкости, а движутся в ней с высокими скоростями. В результате происходит очень бурное перемешивание реакционной массы и образование подвижной пены. Такая система характеризуется весьма малым значением диффузионного сопротивления и поэтому очень эффективна для процессов, идущих в диффузионной области.

К третьей группе относятся аппараты, в которых взаимодействующая с газом (паром) жидкость распыливается в виде мелких капель. Обычно изготавливаются в виде колонн. Распыление жидкости производится сверху, а газ движется снизу. Наибольшая эффективность достигается при большой плотности орошения (определяется отношением объёма подаваемой в аппарат жидкости к площади поперечного сечения колонны). Распыливание производится механические и пневматические форсунками, центробежными распылителями. Преимущества таких аппаратов – низкое гидравлическое сопротивление, возможность обработки газов и паров, содержащих механические примеси, простота и низкая стоимость.

Аппараты для систем двух несмешивающихся жидкостей (жидкостная экстракция) подразделяются на смесительно-отстойные (с мешалками), смесительные (инжекторные, диафрагменные, трубчатые), колонные распылительные (полые), насадочные, тарельчатые, пульсационные, роторно-дисковые и центробежные. Выбор той или иной конструкции определяется конкретными условиями использования и технико-экономическою целесообразностью. Преимущества колонных экстракторов перед смесительно-отстойными – простота конструкции, более низкие капитальные затраты на сооружение и меньший расход энергии на проведение процесса. Однако смесительно-отстойные экстракторы имеют меньшие габариты, меньшее время выхода на режим, менее чувствительны к наличию механических примесей. В пульсационных экстракторах взаимодействующим фазам сообщаются возвратно-поступательные колебания, способствующие интенсивному дроблению дисперсной фазы и соответственно увеличению поверхности контакта фаз, интенсивному их перемешиванию, а также увеличению времени пребывания дисперсной фазы в аппарате. Возвратно-поступательные движения создаются, как правило, пульсатором, находящимся вне аппарата. Недостаток пульсационных аппаратов – ограниченность диаметра (с увеличением диаметра резко повышаются энергетические затраты, а также нарушается равномерность распределения гидродинамические характеристик по сечению аппарата). В роторно-дисковых экстракторах внутри корпуса на равных расстояниях друг от друга находятся кольцевые перегородки, которые крепятся к корпусу. По оси колонны установлен вертикальный вал с горизонтальными дисками, расположенными симметрично относительно перегородок. Чередующиеся диски и перегородки способствуют диспергированию взаимодействующих фаз при их вертикальном перемещении внутри аппарата. В центробежных экстракторах интенсифицируются не только процессы диспергирования и смешения, происходящие в центр. части аппарата, но и процессы разделения под действием центробежных сил, происходящего в ср. части и на периферии экстрактора. Центробежные экстракторы компактны, характеризуются высокими производительностью и коэффициентами массопередачи. Однако из-за короткого времени взаимодействия фаз неприменимы для систем, в которых массообмен сопровождается химической реакцией.

Аппараты для систем твёрдое вещество – жидкость или газ (пар) подразделяются на аппараты для проведения процессов адсорбции и сушки. Аппараты. для процессов адсорбции могут быть с неподвижным слоем и с движущимся слоем адсорбента; полный цикл работы аппаратов, как правило, сводится к четырём стадиям: собственно адсорбция, десорбция, сушка и охлаждение адсорбента. Поскольку техника сушки чрез-

вычайно разнообразна, стремление к интенсификации процессов сушки и повышению производительности единичного агрегата привело к созданию разнообразных конструкций сушильного оборудования.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие массообменные процессы вы знаете?
2. Какие признаки объединяют все массообменные процессы?
3. Каков физический смысл коэффициентов массоотдачи и массопередачи?
4. Что такое молекулярная диффузия?
5. Что является движущей силой массообменных процессов?
6. Приведите примеры оборудования для реализации массообменных процессов.

Список литературы

Основная

1. Машины и аппараты пищевых производств: в 3 кн. Кн. 1/ред. В.А. Панфилов. - М.: КолосС, 2009. - 610 с.- ISBN 978-5-9532-0509-2
2. Машины и аппараты пищевых производств: в 3 кн. Кн. 3/ред. В.А. Панфилов. - 2-е изд., доп. и перераб. - М.: КолосС, 2009. - 551 с. ISBN 978-5-9532-0754-6
3. Процессы и аппараты пищевых производств: учебник для вузов. В 2-х кн. Кн. 2 / А.Н. Остриков, Ю.В. Красовичкий, А.А. Шевцов; ред. А.Н. Остриков. - СПб.: ГИОРД, 2007. - 608 с. ISBN 978-5-98879-051-8
4. Процессы и аппараты пищевых производств: учебник / Ю.М. Плаксин, Н.Н. Малахов, В.А. Ларин. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: КолосС, 2007. - 760 с. ISBN 978-5-9532-0581-8
5. Менх В.Г. Процессы и аппараты пищевых производств: краткий курс лекций. Кемеровский технологический институт пищевой промышленности.- Кемерово, 2003. – 110 с. ISBN-5-89289-057-0

Дополнительная

3. Процессы и аппараты пищевой технологии: учебник/Г.Д. Кавецкий, Б.В. Васильев. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Колос, 2000. - 551 с.
4. Процессы и аппараты пищевых производств: учебник / В.И. Горбатюк. - М.: Колос, 1999. - 330 с.
5. Д.А. Баранов Массообменные аппараты/ Большая советская энциклопедия/ https://bigenc.ru/chemistry/text/2191302

Лекция 14, 15

ПРОЦЕСС СУШКИ

1. Общая характеристика процесса сушки
2. Статика сушки. Расчет сушильного процесса
3. Теоретический сушильный процесс
4. Основные аппараты для сушки продуктов

1. Общая характеристика процесса сушки

СУШКА - удаление жидкости (чаще всего влаги-воды, реже иных жидкостей, напр. летучих орг. растворителей) из веществ и материалов тепловыми способами.

Осуществляется путем испарения жидкости и отвода образовавшихся паров при подводе к высушиваемому материалу теплоты, чаще всего с помощью так называемых сушильных агентов (нагретый воздух, топочные газы и их смеси с воздухом, инертные газы, перегретый пар). Сушке подвергают влажные тела: твердые-коллоидные, зернистые, порошкообразные, кусковые, гранулированные, листовые, тканые и др. (эта группа высушиваемых материалов наиболее распространена); пастообразные; жидкие-суспензии, эмульсии, растворы.

Цель сушки - улучшение качества веществ и материалов, подготовка их к переработке, использованию, транспортированию и хранению. Данный процесс часто является последней технологичесткой операцией, предшествующей выпуску готового продукта. При этом жидкость предварительно удаляют более дешевыми механическими способами, окончательно-тепловыми.

Естественную сушку на открытом воздухе из-за значительной продолжительности используют крайне редко и гл. обр. в районах с теплым климатом. В хим. производствах применяют, как правило, искусственную Сушку, проводимую в специальных сушильных установках, в состав которых входят: сушильный аппарат, или сушилка, где непосредственно протекает процесс; вспомогательное оборудование-теплообменные аппараты (калориферы), тяго-дутьевое устройство (вентилятор, воздуходувка) и система пылеочистки, соотв. для нагревания сушильного агента, пропускания его через сушилку и отделения от высушенного продукта.

По способу подвода теплоты к влажному телу различают след. виды Сушки: конвективную (в потоке нагретого сушильного агента, выполняющего одновременно функции теплоносителя и влагоносителя- транспортирующей среды, в которую переходит удаляемая влага, и в ряде случаев способствующего созданию необходимой гидродинамич. обстановки); контактную (при соприкосновении тела с нагретой поверхностью); диэлектрическую (токами высокой частоты); сублимационную (вымораживанием в вакууме; см. также ***Сублимация***); радиационную (ИК излучением); акустическую (с помощью ультразвука).

Инфракрасная сушка

Наиболее актуальной и перспективной в данный момент является сушка продуктов питания с применением инфракрасного излучения. Инфракрасное излучение твердых тел обусловлено возбуждением молекул и атомов тела вследствие их теплового движения. При поглощении инфракрасного излучения облучаемым телом в нем увеличивается тепловое движение атомов и молекул, что вызывает его нагревание.

Сушка продуктов по данной технологии позволяет сохранить содержание витаминов и других биологически активных веществ в сухом продукте на уровне 80-90% от исходного сырья. При непродолжительном замачивании (10-20 мин.) прошедший сушку продукт восстанавливает все свои натуральные органолептические, физические и химические свойства и может употребляться в свежем виде или подвергаться любым видам кулинарной обработки. Сушка продуктов (сушка овощей и фруктов, сушка рыбы, мяса, круп и т.д.) таким способом дает возможность производства разнообразных пищевых концентратов быстрого приготовления: первые, вторые, третьи блюда, закуски, каши, крупы, овощные и фруктовые порошки, которые используются в хлебопекарной, кондитерской промышленности, как компонент сухих смесей детского питания. По сравнению с традиционной сушкой, овощи, обработанные инфракрасной сушкой после восстановления обладают вкусовыми качествами, максимально приближенными к свежим. Сушка продуктов производится при низкой

температуре - 50-60 градусов Цельсия, сушка продуктов производится с высокой скоростью - 30-200 мин, простота и надежность, низкая цена и высокая окупаемость.

Микроволновая

С помощью микроволнового оборудования действительно можно решать актуальные задачи многих производств - сушить рыбу, мясо, зерно, фрукты и овощи, лесоматериалы, кирпич и овечью шерсть, хлопок-сырец, лекарственные травы, повышать качество комбикормов, извлекать из растительного сырья соединения, альтернативные ядохимикатам (пестициды естественной природы). Микроволновая технология и созданное на ее основе микроволновое оборудование для сушки фруктов, оборудование для сушки овощей позволяет не только высушивать продукцию, но и получать пищевые красители, размораживать рыбу, мясо, овощи, ягоды и другие продукты питания, проводить бестемпературное консервирование и многое другое.

Микроволновый метод сушки основан на воздействии на обезвоживаемый продукт интенсивного электромагнитного поля сверхвысоких частот (СВЧ). Под действием СВЧ поля молекулы воды (диполи) начинают совершать колебательные и вращательные движения, ориентируясь с частотой поля по его электрическим линиям. Движение молекул - это и есть тепловая энергия. Чем больше воды в заданном объеме, чем больше молекул участвует в этом движении, тем больше тепловой энергии выделяется. Таким образом, разогрев происходит во всем объеме продукта, причем более влажные участки получают больше энергии. За счет этого происходит удаление влаги, сушка продукта, и, одновременно, - выравнивание влажности в объеме продукта. Причем при снижении влажности сырья процесс сушки продукта не замедляется, поскольку механизм теплопроводности не играет здесь ключевой роли. Микроволновая сушка рыбы, мяса, грибов, круп, овощей и фруктов характеризуется малым временем и относительно низкой температурой процесса, что применительно к пищевым продуктам обусловливает очень высокую сохраняемость полезных веществ и витаминов.

Применение натуральных сушеных ингредиентов, изготовленных микроволновым способом сушки, позволяет производителям пищевых продуктов. Обогатить продукцию, подвергаемую сушке, витаминами, биологически активными веществами, макроэлементами и другими полезными веществами. Придать продукции вкус, цвет и аромат натурального продукта. Применять сухопродукт вне сезона и во время отсутствия свежих овощей. Гарантировать изготовление продукции высокого качества, микробиологически чистой. Значительно снизить отходы производства. Удешевить хранение и транспортировку продукта. Значительно сократить время приготовления, энерго- и трудозатраты, связанные с обработкой сырых овощей, повысить производительность труда при приготовлении пищи в общественном питании до 48 раз. Увеличить срок хранения продукта до 1 года без применения дополнительных средств химической обработки. Снизить себестоимость продукции.

Сублимационная сушка продуктов (сублимационная вакуумная сушка, также известная как лиофилизация или возгонка) - это удаление влаги из свежезамороженных продуктов в условиях вакуума.

В настоящее время этот метод сушки продуктов является наиболее совершенным, но в то же время и наиболее дорогостоящим. Этот способ был открыт в начале прошлого века, однако использовался только для производства довольно ограниченного количества и ассортимента сухопродуктов для нужд армии и космонавтики.

Принцип сублимационной сушки основан на том физическом факте, что при значениях атмосферного давления ниже определенного порога - т.н. "тройной точки" (для чистой воды: 6,1 мбар при 0 градусов Цельсия) вода может находиться только в двух агрегатных состояниях - твердом и газообразном, переход воды в жидкое состояние в таких условиях невозможен. И если парциальное давление водного пара в окружающей среде ниже чем парциальное давление льда, то лед продукции прямо переводится в газообразное состояние минуя жидкую фазу.

Процесс сублимационной сушки продуктов физически состоит из двух основных этапов (замораживание и сушка продукта) и этапа досушивания. Первый этап это замораживание продукта при температуре ниже его точки затвердевания. Второй этап - сублимирование, удаление льда или кристаллов растворителя при очень низкой температуре, то есть непосредственно сушка продукта. При этом значительное влияние на качество сухопродукта и на время, требующееся для сушки, имеет этап заморозки. Чем быстрее и глубже замораживается продукт, тем менее крупные кристаллы льда образуются в продукте, тем быстрее они испаряются на втором этапе сушки продукта и тем выше качество получаемого продукта. Так как удаление основной массы влаги из объектов сушки происходит при отрицательных температурах (-20...-30 градусов Цельсия), а их досушивание осуществляется также при щадящем (не выше +40 градусов) температурном режиме, то в результате достигается высокая степень сохранности всех наиболее биологически ценных компонентов исходного сырья.

Наибольшее применение сублимационная вакуумная сушка получила в технологиях производства лекарственных препаратов, ферментов, заквасок, экстрактов лекарственных трав и других объектов, которым требуется обеспечить сохранность в сухопродукте всех полезных составляющих сырья в течение длительных периодов времени. Сублимационная сушка продукта является одним из самых современных методов обратимого консервирования микроорганизмов и биопрепаратов, который обеспечивает наилучшее качество сухопродукта и высокую восстанавливаемость лактобактерий при минимальной продолжительности процесса и, соответственно, минимальных затратах.

Поскольку конечная влажность сублимационно-вакуумных материалов является очень низкой (порядка 2-5%), то это создает все предпосылки для их длительного хранения в условиях нерегулируемых температур. Консервирование сублимационной сушкой в перечисленных выше отраслях является прогрессивной технологией, а в ряде случаев - не имеющей альтернативы.

Кондуктивный способ сушки пищевых продуктов основывается на передаче тепла высушиваемому продукту путем непосредственного контакта с нагреваемой поверхностью сушильного оборудования.

Для сушки продуктов питания этот способ используется не часто. Высокого качества конечного сухопродукта достичь не удается вследствие неравномерности влажности конечного продукта; продукт, контактирующий с нагретой поверхностью в период сушки, пересушивается, что приводит к необратимости процессов восстановления, а из-за высокой температуры (320-340 градусов Цельсия) в камере сушильного оборудования, конечный сухопродукт теряет 30-40% витаминов и биологически активных веществ и становится ломким. Большее применение этот способ сушки находит при сушке пиломатериалов, а также сырья и продукции в текстильной промышленности.

При кондуктивной сушке продукта тепло сообщается влажному материалу только от греющей поверхности и передается к открытой поверхности продукта с

последующей отдачей его в окружающую среду. Количество тепла, полученное от греющей поверхности, расходуется на испарение влаги на потери тепла лучеиспусканием и конвекцией открытой поверхностью сухопродукта в окружающую среду. Доля этих потерь в общем расходе тепла невелика и составляет максимально 3-5%, что делает сушильное оборудование достаточно эффективным. Однако потребительские качества сухопродуктов и содержание в них исходных веществ делают этот способ сушки продуктов редко используемым.

Одним из самых распространенных способов сушки продуктов в настоящее время является **конвективный способ сушки.**

Этот способ сушки продуктов основан на передаче тепла высушиваемому продукту за счет энергии нагретого сушильного агента - воздуха или парогазовой смеси. Сушка продуктов при этом способе происходит при омывании продукта нагретым газом, воздухом, топочными газами, перегретым паром и другими теплоносителями, которые имеют температуру, отличную от температуры подвергающегося сушке материала. При этом способе сушки за счет сообщаемой продукту тепловой энергии идет испарение находящейся в продукте влаги, а унос паров влаги осуществляется сушильным агентом. Различают конвективную сушку материалов в слое, при которой применяются сушилки с омыванием материала в слое или изделия агентом сушки (туннельные, камерные, петлевые, валковые, турбинные, ленточные, шахтные сушилки), а также конвективная сушка с сопловым обдувом плоских материалов. Кроме этого различают конвективную сушку материалов или изделий во взвешенном и полувзвешенном состоянии, которая может осуществляться в барабанных установках, в установках с кипящим слоем, в пневматических трубах-сушилках, в вихревом потоке, а также с помощью сушки распылением.

Оборудование для сушки овощей, оборудование для сушки фруктов и любое сушильное оборудование, основанное на этом способе, имеет простое устройство. Установки имеют высокие удельные энергозатраты, которые составляют от 1.6 до 2,5 кВт.ч/кг. Однако этому способу присущи некоторые недостатки, касающиеся нерационального использования энергии установками, поскольку сушка продукта таким способом неизбежно сопровождается потерями тепла на нагрев конструкций и окружающей среды. При интенсификации процессов такой сушки продуктов необходимо повышать температуру теплоносителя, что влечет перегрев сухопродукта, особенно на стадии досушки. Кроме того, этому способу сушки продуктов присущи недостатки, существенно снижающие качество конечного продукта. При этой сушке испарение влаги происходит только с поверхности, что приводит к появлению пленки, затрудняющей сушку и ухудшающей качество сухопродукта: изменяется цвет, вкус и естественный аромат продукта, снижается его восстанавливаемость при замачивании. Высокая температура и высокая продолжительность сушки способствуют развитию окислительных процессов и приводят к потерям витаминов и биологически активных веществ в сухопродукте, и не способствует подавлению первичной микрофлоры.

Акустический метод сушки продуктов основан на воздействии на обезвоживаемый продукт интенсивных ультразвуковых волн. Данный процесс сушки носит циклический характер, волна выбивает влагу, находящуюся на поверхности продукта, затем оставшаяся влага равномерно распределяется по капиллярам и процесс повторяется снова. Это происходит до тех пор, пока продукт не достигнет заданной влажности.

Акустический способ позволяет сушить широкий набор материалов: продукты сельского хозяйства (зерно, овощи, фрукты и другие), древесина, хлопок,

лекарственные препараты и травы, бумага, продукция химической и других отраслей промышленности.

При акустической сушке влага экстрагируется из подвергаемого сушке продукта под действием звука с соответствующими характеристиками. Принципиальная особенность способа: сушка продуктов протекает без повышения температуры продуктов. Реализуется "холодная" сушка. Это обстоятельство снимает все негативные последствия, связанные с термическим воздействием на сухопродукт. Именно поэтому это единственный способ сушки, пригодный для сушки термочувствительных и легко окисляющихся материалов. Обработка продуктов акустическими колебаниями высокой интенсивности благоприятно сказывается на физико-химических и потребительских свойствах сухопродукта (например, увеличивает всхожесть семян и др.).

Сушка продуктов акустическим способом отличается от обычных методов и по скорости выработки сухопродукта. Например, при сушке ферментов (разрушающихся при температуре в 40 градусов Цельсия) в акустическом поле скорость сушки продуктов в сравнении с вакуумным методом повышается в 3-4 раза.

2. Статика сушки. Расчет сушильного процесса

Под статикой Сушки обычно понимают, состояние термо-динамического равновесия в системе влажное тело-газ, а также материальный и тепловой балансы сушилок в установившемся режиме работы.

Процесс сушки твердых веществ зависит от характера связи удаляемой влаги.

Формы связи влаги с материалом в значительной степени определяют механизм и скорость сушки: чем эта связь прочнее, тем труднее протекает процесс. При сушке связь влаги с материалом нарушается. Различают следующие формы связи (в порядке убывания ее энергии): химическую, физико-химическую, механическую.

Химически связанная влага (гидратная, или кристаллизационная, влага комплексных соединений) соединена с материалом наиболее прочно и при сушке обычно удаляется частично или вообще не удаляется.

Физ.-хим. связь объединяет адсорбционную и осмотическую влагу (например, в Коллоидных и полимерных материалах). Адсорбционно связанная влага прочно удерживается силами межмол. взаимод. на пов-сти пор материала в виде монослоя или неск. слоев (см. ***Адсорбция*****).** Осмотически связанная влага находится внутри и между клеток материала и менее прочно удерживается осмотич. силами (см. ***Осмос*****).** Влага этих видов связи с трудом удаляется при сушке.

Механическая, или капиллярно связанная, влага подразделяется на влагу макрокапилляров (радиус более 10^{-7} мм) и микрокапилляров (менее 10^{-7} мм). Влага макрокапилляров наименьше прочно связана с материалом и может быть удалена не только при сушке, но и механически.

Влага, удаляемая при сушке, называется свободной. Обычно при сушке твердых веществ удаляют капиллярную и внутриклеточную влагу. Под капиллярной понимается влага, которая наполняет многочисленные макро- и микрокапилляры вещества. Внутриклеточная влага – при сушке эндокринного сырья и свежесобранных лекарственных растений. Влага, химически связанная с материалом (гидратная или кристаллизационная), при сушке не удаляется.

Сушка состоит из трех этапов:

1) перемещение влаги внутри высушиваемого материала по направлению к его поверхности;
2) парообразование;

3) перемещение пара от поверхности материала в окружающую среду.

Подобное перемещение или миграция влаги представляет собой диффузионный процесс, движущей силой которого является разность концентраций влаги.

Количество мигрирующей влаги под действием разности ее концентраций

$$W_c = -K_в \left(dc/dn\right) S\tau, \ кг/сек \qquad (14.1)$$

где $K_в$ - коэффициент влагопроводности, $м^2/с$;

S – поверхность контакта продукта с источником теплоты, $м^2$;

dc/dn - градиент концентраций влаги в продукте, $кг/м$;

τ - продолжительность процесса, сек.

Миграция влаги внутри продукта происходит также под действием температурного градиента. Уравнение, с помощью которого можно определить количество влаги, перемещаемой за счет действия этого фактора имеет вид:

$$W_t = -K_t \left(dt/dn\right) St, \quad кг/сек \qquad (14.2)$$

где K_t - коэффициент термовлагопроводности, $кг/м \cdot К$;

dt/dn - градиент температур, $К/м$

Расчет сушильного процесса обычно проводят в следующей последовательности: составляют материальный баланс и определяют количество испаренной влаги, составляют тепловой баланс и находят требуемое кол-во теплоты.

В расчетах процесс сушки выражается уравнением массопередачи:

$$W = K \cdot F \left(P_M - P_П\right), \ кг/сек \qquad (14.3)$$

где W – количество испаряемой влаги, кг/сек;

K – коэффициент массопередачи, сек/м;

F – поверхность соприкосновения фаз, м²;

P_M – давление паров влаги у поверхности материала, н/м²;

$P_П$ – парциальное давление в воздухе, н/м².

Движущая сила процесса сушки определяется разностью давления паров влаги у поверхности материала и парциального давления паров в воздухе, т.е. (Рм – Рп). Чем больше эта разница, тем интенсивнее идет процесс испарения влаги.

Скорость сушки определяется количеством влаги, испаряемой с единицы поверхности в единицу времени:

$$\mathrm{V} = \mathrm{W}/\mathrm{F} \cdot \mathrm{r}, \ кг/м^2 сек \qquad (13.4)$$

Продолжительность процесса сушки зависит от скорости сушки.

Главные факторы сушки: 1) природные особенности высушиваемого материала – его структура, характер связи с водой, химический состав и т.д.; 2) общая поверхность высушиваемого материала, зависит от размера кусков, толщины слоя. Чем больше поверхность высушиваемого материала, тем быстрее протекает сушка; 3) количество влаги, подлежащей удалению; 4) влажность и температура воздуха. Чем выше температура воздуха и ниже его относительная влажность, тем быстрее протекает сушка; 5) скорость движения теплоносителя. Чем с большей скоростью проходит теплый воздух в сушилках, тем интенсивнее теплообмен между ним и высушиваемым материалом; 6) интенсивность перемешивания высушиваемого материала. Чем лучше перемешивается материал, тем больше активная поверхность испарения и тем быстрее протекает сушка.

Материальный баланс сушки можно представить в нескольких вариантах. Первое уравнение материального баланса показывает количество влаги, испарившейся во время сушки продукта, кг

$$W_{уд} = G_{и} - G_{с}, \text{ кг} \quad (14.5)$$

где $G_{и}$ - количество исходного продукта, кг

$G_{с}$ - количество сухого (готового) продукта, кг

Второе уравнение материального баланса составляют, исходя из концентрации сухих веществ в продукте:

$$G_{и}C_{и} = G_{с}C_{с} = (G_{и} - W_{уд})C_{с}, \quad (14.6)$$

где $C_{и}$ и $C_{с}$ - концентрация сухих веществ в исходном и сухом продуктах, %

Третье уравнение материального баланса составляют, исходя из содержания влаги в продукте:

$$G_{и}(100 - W_{и}) = G_{с}(100 - W_{с}), \quad (14.7)$$

где $W_{и}$ и $W_{с}$ - содержание влаги в исходном и сухом продукте, %

Основное уравнение теплового баланса процесса сушки в общем виде может быть представлено следующим образом:

$$Q_{общ} = Q_{и} + Q_{исп} + Q_{с} + Q_{п}, \text{ Дж} \quad (14.8)$$

где $Q_{общ}$ - общий расход теплоты, Дж;

$Q_{и}$ - расход тепла на прогрев исходного продукта, Дж;

$Q_{исп}$ - количество теплоты, необходимое на испарение влаги из высушиваемого продукта, Дж;

$Q_{с}$ - количество теплоты, уносимое с сухим продуктом, Дж;

$Q_{п}$ - количество теплоты, теряемое в окружающую среду, Дж.

В свою очередь каждый из членов уравнения может быть определен

$$Q_{и} = G_{и}C_{и}(t_{исп} - t_{н}), \quad (14.9)$$

где $C_{и}$ - теплоемкость исходного продукта, $Дж/кг \cdot К$;

$t_{исп}$ - температура испарения влаги, К;

$$Q_{исп} = W_{уд} \cdot r, \quad (14.10)$$

где r – теплота парообразования при температуре сушки, $Дж/кг$;

$W_{уд}$ - количество испарившейся влаги, кг

$$Q_{с} = G_{с}C_{с}t_{с}, \quad (14.11)$$

где $t_{с}$ - температура сухого продукта, ^{o}C;

$C_{с}$ - теплоемкость сухого продукта, $Дж/кг \cdot К$.

$Q_{п}$ - принимаем равной $10 \div 20\%$ от общего расхода теплоты.

3. Теоретический сушильный процесс

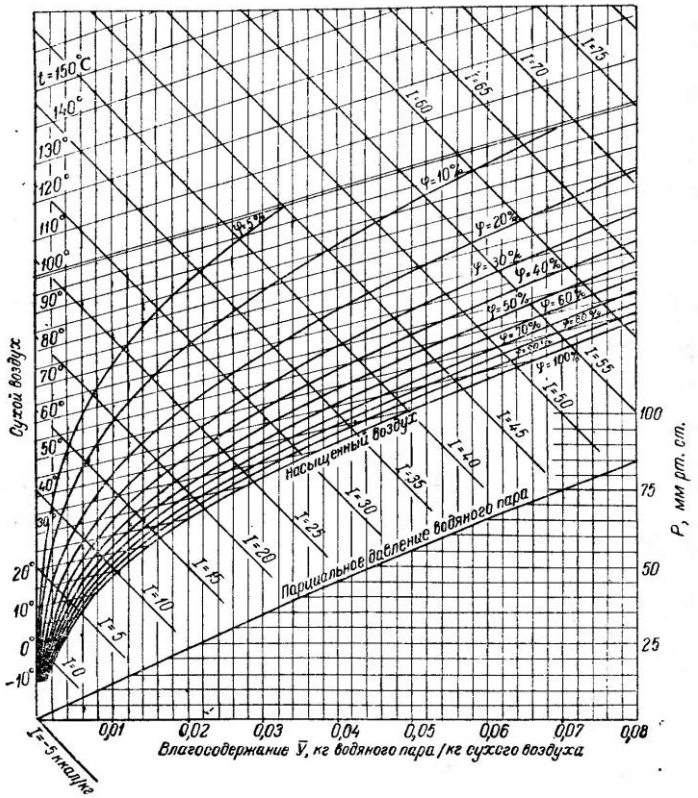
При любом виде сушки ее влажный объект находится в контакте с влажным газом (в основном с воздухом). Поэтому важно знание параметров не только

высушиваемого объекта, но и параметров воздуха. Основные параметры влажного газа: влагосодержание – отношение массы паров к массе абсолютно сухой части; температура; влажность – отношение пара в данной объеме к массе насыщенного пара в том же объеме при одинаковых условиях; удельная энтальпия.

Расчет изменения состояния атмосферного воздуха с помощью уравнений для идеального газа требует выполнения громоздких вычислений. Более простым и удобным является расчет с помощью J-d-диаграммы, рисунок 13.1, предложенной Л. К. Рамзиным в 1918 году. В координатах J-d наносят зависимости основных параметров влажного воздуха: температуры, влагосодержания, относительной влажности, энтальпии и парциального давления водяных паров при заданном барометрическом давлении (рис. 4.1). По оси ординат откладывают энтальпию на 1 кг сухого воздуха, а по оси абсцисс (т.е. по нижней кромке диаграммы) — Шкала влагосодержаний, при этом линии постоянных влагосодержаний представляют вертикальные прямые, т.е. параллельно оси ординат (в г на 1 кг сухого воздуха). J-d-диаграмма построена в косоугольной системе координат с углом между осями 135 °С. Такая система позволяет расширить на диаграмме область ненасыщенного влажного воздуха, что делает ее удобной для графических построений Линии постоянной энтальпии (J=const) проходят под углом 135° к ординатам или к вертикальным линиям влагосодержаний В связи с тем, что область диаграммы, расположенной между горизонталью, проведенной из начала координат, и осью абсцисс, не представляет интереса для расчетов с влажным воздухом, ее в диаграмме обычно не приводят. Значение влагосодержания d переносят с оси абсцисс на вспомогательную горизонтальную координатную ось и называют ее условно осью абсцисс.

Id-диаграмма, другое название — диаграмма состояний влажного воздуха, используется при расчете параметров воздухообмена в помещении и позволяет быстро определить все параметры влажного воздуха по двум известным параметрам. Использование диаграммы позволяет наглядно отобразить сушильный процесс.

Пример id-диаграммы приведен на рисунке (при переходе по ссылке откроется версия диаграммы для печати). В представленной системе координат линии постоянных температур представляют из себя прямые линии, идущие под небольшим наклоном к горизонтали и слегка расходящиеся веером. Рабочее поле диаграммы ограничено кривыми линиями равных относительных влажностей 0% и 100%, между которыми нанесены линии других значений равных относительных влажностей с шагом 10%. Шкала температур обычно располагается по левой кромке рабочего поля диаграммы. Значения энтальпий воздуха нанесены обычно под кривой Ф=100. Значения парциальных давлений иногда наносят по верхней кромке рабочего поля, иногда по нижней кромке под шкалой влагосодержаний, иногда по правой кромке. В последнем случае на диаграмме добавочно строят вспомогательную кривую парциальных давлений. При определении параметров влажного воздуха на id-диаграмме, точка на диаграмме отражает состояние воздуха, а линия — процесс изменения состояния. Кривую с относительной влажностью ф = 100% строят по данным таблиц насыщенного воздуха. Область диаграммы выше этой кривой относится к области ненасыщенного влажного воздуха, а область диаграммы ниже кривой насыщения (ф =100%) характеризует состояние перенасыщения влажного воздуха. В этой области насыщенный воздух содержит влагу в жидкой или твердой среде (туман). Так как эта часть диаграммы не представляет интереса при расчетах, связанных с влажным воздухом, ее не строят. В этой части диаграммы обычно наносят линию парциального давления пара.



Значения парциального давления пара откладывают на вспомогательной прямой в правой части диаграммы. Каждая точка на поле диаграммы соответствует определенному состоянию воздуха. Положение точки определяется любыми двумя из пяти (I, d, t, ф, $p_п$) параметрами состояния. Исключение составляет сочетание параметров p и d, которые имеют однозначную взаимосвязь. Остальные три параметра могут быть определены по J-d-диаграмме как производные. Когда состояние влажного воздуха характеризуется точкой А (рисунок 14.2), лежащей выше кривой ф = 100%, водяной пар в воздухе находится в перегретом состоянии. Если состояние влажного воздуха характеризуется точкой А1 (на кривой насыщения ф = 100%), то водяной пар в воздухе находится в насыщенном состоянии. И, наконец, если заданная точка A_2 лежит ниже кривой насыщения, то температура влажного воздуха ниже температуры насыщения и в воздухе находится влажный пар, т. е. смесь сухого насыщенного пара и капелек воды.

В проектной практике J-d-диаграмму используют не только для определения параметров состояния воздуха, но и для построения изменения его состояния при нагревании, охлаждении, увлажнении, осушении, смешении, при произвольной последовательности и сочетании этих процессов. На J-d-диаграмме могут быть построены еще два параметра, которые широко используются при расчетах вентиляции и кондиционирования воздуха, — температура точки росы $t_р$ и температура мокрого термометра $t_М$.

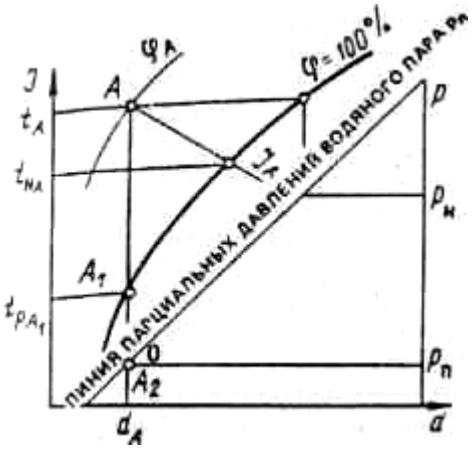


Рисунок 14.2. - Схема определения параметров воздуха с помощью J-d-диаграммы.

Температурой точки росы воздуха tp называется температура, до которой нужно охладить ненасыщенный воздух, чтобы он стал насыщенным при сохранении постоянного влагосодержания. Для определения температуры точки росы необходимо на поле J-d-диаграммы из точки, характеризующей заданное состояние влажного воздуха, провести прямую, параллельную оси ординат, до пересечения с кривой Ф = 100%. Изотерма, пересекающая в этой точке кривую насыщения, будет характеризовать температуру точки росы tp.

Температурой мокрого термометра tM является такая температура, которую принимает влажный воздух при достижении насыщенного состояния и сохранении постоянной энтальпии воздуха, равной начальной. Для определения температуры мокрого термометра необходимо на поле J-d-диаграммы через точку, соответствующую состоянию влажного воздуха, провести линию J=const до пересечения с кривой ф =100%. Изотерма, проходящая через точку пересечения, соответствует значению температуры воздуха по мокрому термометру.

4. Основные аппараты для сушки продуктов

Промышленные сушилки. В соответствии с многообразием высушиваемых материалов, их св-в и условий обработки конструкции сушилок также очень разнообразны и отличаются: по способу подвода теплоты (конвективные, контактные, специальные); по виду сушильного агента (воздушные, газовые, паровые); по давлению в сушильной камере (атмосферные, вакуумные); по способу организации процесса (периодич. или непрерывного действия); по взаимному направлению движения высушиваемого материала и сушильного агента (в конвективных аппаратах-прямоток, противоток, перекрестный ток); по состоянию слоя влажного материала в аппарате (с неподвижным, движущимся или взвешенным слоем).

Конвективные сушилки. Необходимая для сушки теплота обычно доставляется нагретым воздухом, топочными газами либо их смесью с воздухом. Если не допускается соприкосновение высушиваемого материала с кислородом воздуха или если пары удаляемой влаги огнеопасны, сушильными агентами служат инертные газы (азот, CO_2 и др.) либо перегретый водяной пар. В простейшем случае сушильный процесс осуществляется т. обр., что сушильный агент, нагретый до температуры, предельно допустимой для высушиваемого материала, однократно используется в аппарате. Для термолабильных материалов (например, полиэтилена) сушильный агент

только частично подогревается в основном калорифере, а остальную теплоту получает в дополнительных калориферах, установленных в сушильной камере. В случае материалов, Сушка которых требует (для предотвращения усадки) повышенное влагосодержания теплоносителя и невысоких температур (например, древесина, формованные керамические изделия), применяют сушилки с рециркуляцией части отработанного воздуха, а также сушилки с промежуточным его подогревом между отдельными зонами и одновременной рециркуляцией. Для сушки огне- и взрывоопасных материалов или при удалении из высушиваемых материалов ценных продуктов (углеводороды, спирты, эфиры и др.) используют сушилки с замкнутой циркуляцией потока инертных газов либо воздуха.

Камерные сушилки. В них высушиваемый материал находится неподвижно на полках, установленных в одной или несколько сушильных камерах. Засасываемый вентилятором и нагретый в калориферах воздух проходит между полками над материалом. Сушилки работают периодически при атм. давлении и применяются в малотоннажных производствах для материалов с невысокой температурой сушки (например, красители).

Туннельные сушилки (рисунок 14.3) - камерные сушилки непрерывного действия. Представляют собой длинные (типа коридора) камеры, внутри которых по рельсам перемещаются тележки (вагонетки) с лежащим на лотках или противнях высушиваемым материалом. Нагретый воздух обтекает лотки прямо- или противотоком; возможна рециркуляция воздуха. Эти сушилки используют для сушки кирпича, керамических изделий, окрашенных и лакированных металлические поверхностей, пищевых продуктов и т.п.

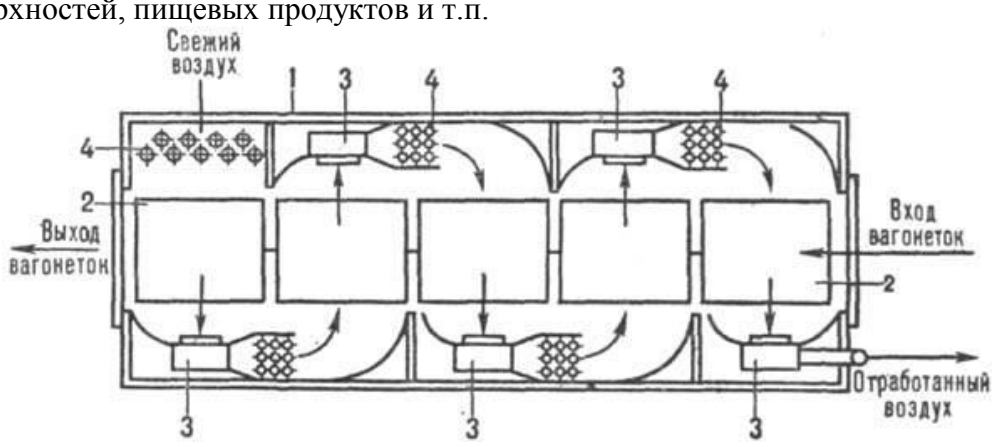


Рисунок 14.3 - Туннельная сушилка:
1-камера (коридор); 2-вагонетки; 3-вентиляторы; 4-калориферы.

Ленточные сушилки (рисунок 14.4.) обычно выполняют в виде многоярусного ленточного транспортера, по к-рому в камере, действующей при атм. давлении, непрерывно перемещается материал, постепенно пересыпаясь с верхней ленты на нижележащие (скорость каждой ленты 0,1-1 м/мин). Сушильный агент может двигаться со скоростью не более 1,5 м/с прямо- или противотоком, а также сквозь слой материала при наличии перфорированной ленты. Эти сушилки компактнее, чем камерные и туннельные, и отличаются большей интенсивностью сушки, однако также сложны в обслуживании из-за необходимости ручного труда, перекосов и растяжений лент. Область применения - сушка зернистых, гранулированных, крупнодисперсных и волокнистых материалов; непригодны для сушки тонкодисперсных пылящих

материалов. Для сушки последних используют ленточные сушилки с формующими питателями, например рифлеными вальцами (вальце-ленточные сушилки).

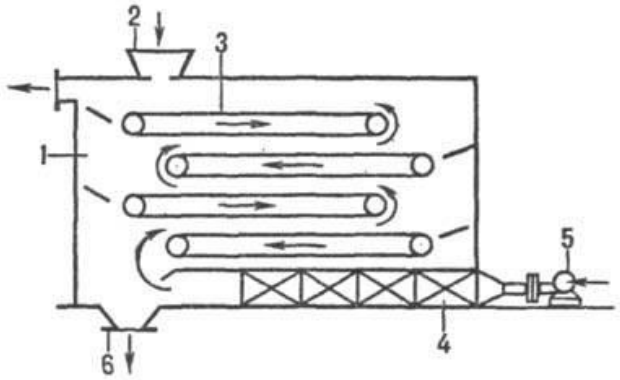


Рисунок 14.4 - Ленточная сушилка: 1-камера; 2, 6-загрузочный и разгрузочный бункеры; 3 - ленточный транспортер; 4 - калорифер; 5-вентилятор.

Для обезвоживания пастообразных и листовых материалов иногда служат непрерывно действующие при атм. давлении петлевые сушилки (рисунок 9.5) - разновидность ленточных сушилок. Влажный материал с помощью питателя подается на бесконечную сетчатую ленту, вдавливается в ее ячейки, проходя через обогреваемые паром валки, после чего поступает в сушильную камеру, где движущаяся сетка образует ряд петель. Посредством автоматического ударного устройства высушенный материал сбрасывается в разгрузочный шнек. Горячий сушильный агент движется поперек ленты. Такие сушилки обычно работают с промежуточным подогревом воздуха, частичной рециркуляцией его по зонам и обеспечивают большую скорость сушки по сравнению с камерными сушилками, но конструктивно сложны и требуют значит, эксплуатационных расходов.

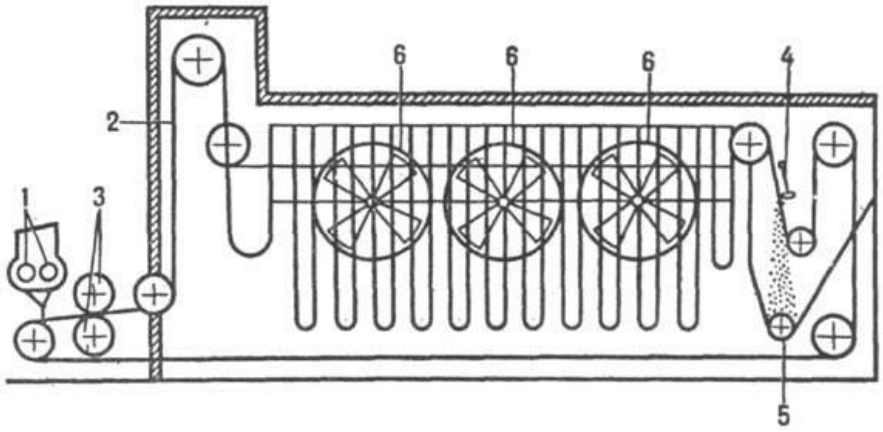


Рисунок 14.5 - Петлевая сушилка:
1-питатель; 2-лента; 3-валки; 4-автоматич. ударное устройство; 5-разгрузочный шнек; 6-вентиляторы.

Барабанные сушилки (рисунок 14.6) распространены благодаря высокой производительности, простоте конструкции и возможности непрерывно сушить при атм. давлении мелкокусковые и сыпучие материалы (колчедан, уголь, фосфориты, минеральные соли и др.). Такая сушилка представляет собой установленный с небольшим наклоном к горизонту (угол до 4°) цилиндрический барабан с бандажами. Последние при вращении барабана (с помощью зубчатого колеса от электропривода) с частотой 5-6 мин:[1] катятся по опорным роликам; осевое смещение барабана предотвращается опорно-упорными роликами. Влажный материал через питатель поступает в барабан и равномерно распределяется по его сечению размещенными

внутри насадками. Тесно соприкасаясь при пересыпании с сушильным агентом, напр. топочными газами (возможен также контактный подвод теплоты через спец. трубчатую насадку), материал высушивается и движется к разгрузочному отверстию в приемном бункере. Газы поступают из примыкающей к барабану топки и просасываются прямотоком через него вентилятором со скоростью 0,5-4,5 м/с; для улавливания из газов пыли между барабаном и вентилятором установлен циклон. Напряжение рабочего объема барабана по испаренной влаге достигает 200 кг/($м^3$-ч).

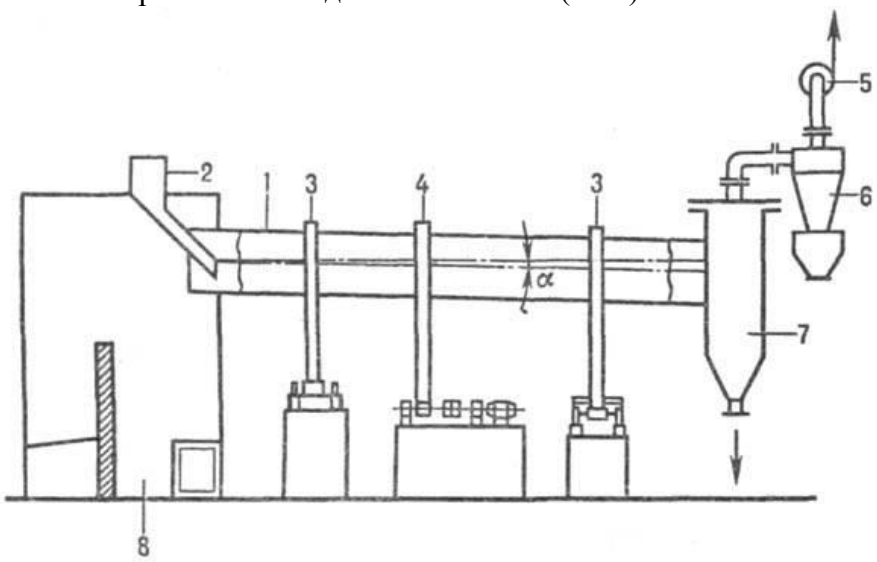


Рисунок 14.6 - Барабанная сушилка:
1-барабан; 2-питатель; 3-бандажи; 4-зубчатое колесо; 5 - вентилятор; 6-циклон; 7-приемный бункер; 8-топка.

Сушилки со взвешенным слоем характеризуются высокими относительными скоростями движения фаз и развитой поверхностью контакта. Основной гидродинамические режимы работы: псевдоожижение; фонтанирование. При существенном уменьшении в процессе сушки массы частиц дисперсного материала применяются режимы свободного фонтанирования и проходящего кипящего слоя. Среди этих сушилок наиболее распространены пневматические, вихревые камеры, аппараты с кипящим и фонтанирующим слоем, вибрационные.

Пневматические сушилки (рисунок 14.7) представляют собой одну или несколько последовательно соединенных вертикальных труб длиной 15-20 м. В них через питатель подается влажный материал и вентилятором снизу нагнетается воздух, нагретый в калорифере. Материал увлекается потоком воздуха, движущимся со скоростью 15-25 м/с. В циклоне сухой материал отделяется от воздуха и удаляется через разгрузочное устройство; воздух через фильтр выводится в атмосферу. Для активизации режима сушки в трубы-сушилки вставляют турбулизаторы (расширители, отклоняющие пластины, завихрители и т.п.). Вследствие кратковременности контакта (1-5 с) такие сушилки пригодны для обработки термически нестойких материалов даже при высокой т-ре сушильного агента; их отличают также компактность, простота конструкции, но одновременно повышаются расходы электроэнергии и теплоты (до 8,4 кДж/кг влаги).

Вихревые сушильные камеры-наиболее интересные представители аппаратов с закрученными потоками сушильного агента. Эти камеры представляют собой дисковые аппараты, напоминающие центробежный вентилятор с тангенциальным подводом теплоносителя. Влажный сыпучий или волокнистый материал загружается питателем

через боковую часть камеры и под действием газовых струй закручивается, образуя в аппарате кольцевой вращающийся слой. Скорость истечения газа 50-80 м/с, время пребывания в камере материала 10-20 с и 2-3 мин для частиц размером соотв. 0,1-0,2 и 3-4 мм.

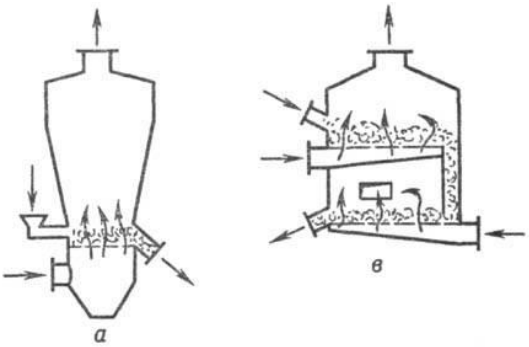


Рисунок 14.7 - Пневматическая сушилка: 1-бункер; 2-питатель; 3-труба; 4-вентилятор; 5-калорифер; 6-сборник-амортизатор; 7-циклон; 8-разгрузочное устройство; 9- фильтр.

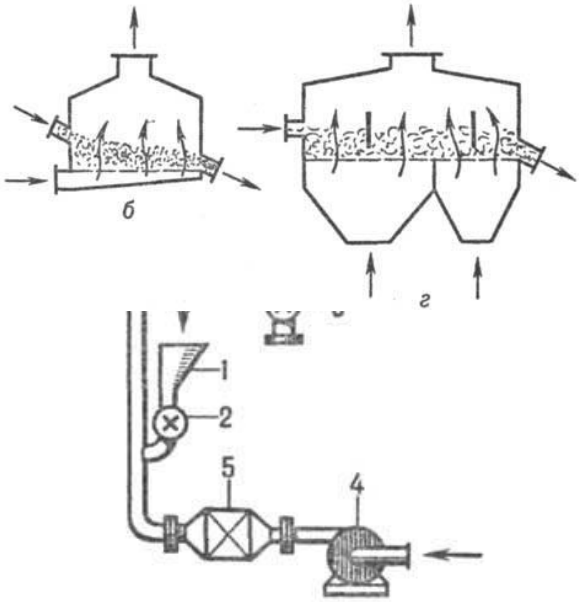


Рисунок 14.8 - Сушилки с кипящим слоем: *а, б*-односекционные соотв. с ненаправленным и направленным движением материалов (в первом случае-термостойких, во втором-трудно высыхающих, для к-рых необходима высокая равномерность сушки); *в, г* - многосекционные соотв. с расположением секций одна над другой и разделением их перегородками (для термочувствит. материалов, свойства которых сильно изменяются при сушке); пунктирные линии-газораспределительной решетки.

Сушилки с кипящим слоем (КС, рисунок 14.8) бывают постоянного, расширяющегося, прямоугольного, а также круглого сечения (в последних меньше вероятность образования застойных зон). Работа таких аппаратов существенно зависит от конструкции газораспределительных решеток, до к-рым перемещается материал и которые могут быть плоскими, выгнутыми, выпуклыми, с отверстиями различной конфигурации; через них снизу продувается предварительно нагретый сушильный агент [объемный коэффициент теплоотдачи 6-12 кВт/(м·К)]. Используют одно- и многосекционные сушилки. В односекционных аппаратах, применяемых часто для удаления поверхностной влаги (удельный влагосъем достигает 1000 кг с 1 м^2 решетки), вследствие близости по гидродинамике к аппаратам идеального смешения наблюдается значит. разброс времен пребывания частиц материала, что приводит к неравномерности С.; многосекционные сушилки обеспечивают большую равномерность высушивания материала. Аппараты с КС позволяют обрабатывать разнообразные сыпучие материалы; С. паст, суспензий и р-ров возможна в кипящем слое инертных частиц (на их нагретой поверхности).

Сушилки с фонтанирующим слоем-цилиндро-конические, а также вытянутые (в виде желоба) аппараты. В этих сушилках создастся режим фонтана, в ядре которого частицы материала движутся вверх в режиме пневмотранспорта, а на периферии медленно сползают вниз. Область применения-С. плохо псевдоожижаемых зернистых материалов с более крупными частицами, чем в аппаратах с КС.

Вибрационные сушилки бывают с виброаэрокипящим или с виброкипящим слоем. В первом случае материал ожижается благодаря воздействию вибраций и потока газа, поступающего через перфорированное днище, во втором-только за счет вибраций. Частота и амплитуда последних обычно 20-60 Гц и 2-10 мм.

Сушилки с виброаэрокипящим слоем используют для С. слипающихся и комкующихся дисперсных материалов, сушилки с виброкипящим слоем-гл. обр. для досушки материалов или С. материалов с хорошими сыпучими свойствами.

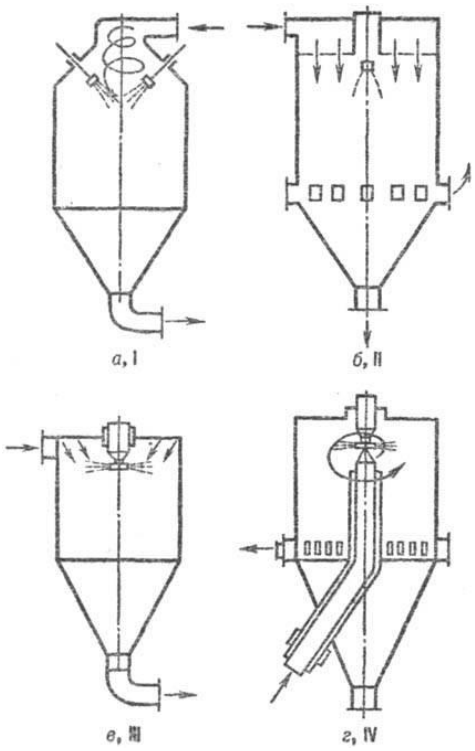


Рисунок 14.9 - Сушилки с форсуночным (*а, б*) и дисковым (*в, г*) распылением материалов: I - центральный закрученный подвод сушильного агента (прямоточный аппарат); II-равномерное распределение газов по сечению через решетку; III-равномерная подача газов над факелом распыла по всему сечению камеры; IV-сосредоточенная подача газов под корень факела распыла.

Распылительные сушилки (рисунок 14.9) имеют цилиндрические или цилиндро-конические камеры. В них вязкие жидкие (молоко, кровь, альбумин и т. д.) и текучие пастообразные материалы распыляются в поток горячего сушильного агента механическими и пневматическими форсунками, а также вращающимися с окружной скоростью 100-200 м/с центробежными дисками (расход энергии на распыление 1 т материала составляет соотв. 2-4, 50-70 и 50-100 кВт·ч). При С. в распыленном состоянии материала, движущегося прямо- или противотоком, а также смешанным током с нагретым сушильным агентом, благодаря большой удельной поверхности испарения влаги процесс завершается в течение 15-30 с. Производительность сушилок по испаренной влаге 10-20000 кг/ч. Недостатки: громоздкость из-за относительно низкого напряжения рабочего объема сушильной камеры по влаге [до 25 кг/($м^3$·ч)]; конструктивно сложные и дорогие в эксплуатации распыливающие и пылеулавливающие устройства.

Вальцовые сушилки (рисунок 14.10) предназначены для непрерывной атмосферной или вакуумной сушки вязких, жидких и пастообразных материалов (красители, пектиновый клей, молоко и т.п.). Основные элементы-обогреваемые водяным паром полые вальцы, вращающиеся с частотой 1-13 $мин^{-1}$; сушилки м. б. одно- и двухвальцовые. Материал смачивает поверхность вальцов и высушивается в тонком слое; толщина сухой пленки, снимаемой спец. ножами, составляет 0,1-1,0 мм. Расход пара по испаряемой влаге 1,2-1,6 кг/кг, напряжение поверхностисти вальцов по влаге для атмосферных и вакуумных сушилок соотв. 13-15 и 25-70 кг/($м^2$·ч).

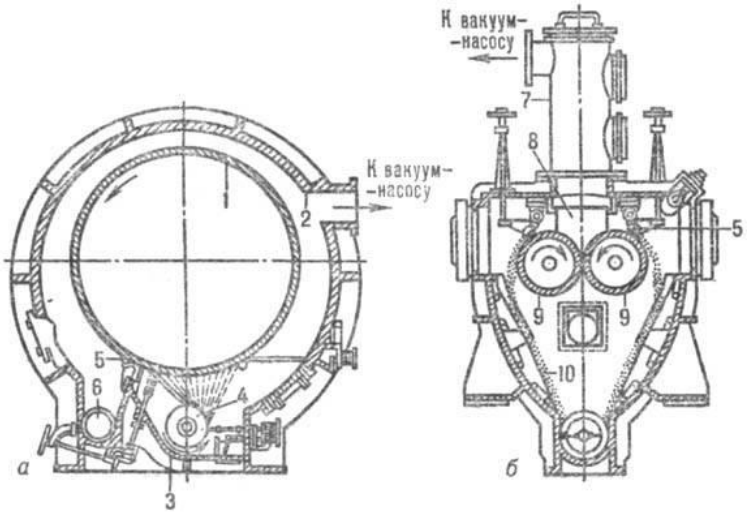


Рисунок 14.10. - Вальцовые вакуум-сушилки: *а*-одновальцовая; *б*-двухвальцовая; 1-корпус; 2-полый барабан (валец); 3-корыто; 4-распределит. валик; 5-нож; 6-шнек; 7-приемный колпак; 8-сборник; 9-вальцы; 10-наклонная стенка.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое сушка?
2. Какие виды сушки вы знаете?
3. Какие сушилки вы знаете?
4. Опишите методику построения процесса сушки в диаграмме Рамзина.
5. Напишите формулу материального баланса сушки.
6. Опишите принцип действия распылительных сушилок.
7. Опишите принцип действия вальцовых сушилок.
8. Опишите принцип действия барабанной сушилки.

Список литературы

Основная

1. Машины и аппараты пищевых производств: в 3 кн. Кн. 1/ред. В.А. Панфилов. - М.: КолосС, 2009. - 610 с.- ISBN 978-5-9532-0509-2
2. Машины и аппараты пищевых производств: в 3 кн. Кн. 3/ред. В.А. Панфилов. - 2-е изд., доп. и перераб. - М.: КолосС, 2009. - 551 с. ISBN 978-5-9532-0754-6
3. Процессы и аппараты пищевых производств: учебник для вузов. В 2-х кн. Кн. 2 / А.Н. Остриков, Ю.В. Красовичкий, А.А. Шевцов; ред. А.Н. Остриков. - СПб.: ГИОРД, 2007. - 608 с. ISBN 978-5-98879-051-8
4. Процессы и аппараты пищевых производств: учебник / Ю.М. Плаксин, Н.Н. Малахов, В.А. Ларин. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: КолосС, 2007. - 760 с. ISBN 978-5-9532-0581-8

Дополнительная

1. Процессы и аппараты пищевой технологии: учебник/Г.Д. Кавецкий, Б.В. Васильев. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Колос, 2000. - 551 с.
2. Процессы и аппараты пищевых производств: учебник / В.И. Горбатюк. - М.: Колос, 1999. - 330 с.

Лекция 16
ПРОЦЕСС ПЕРЕГОНКИ И РЕКТИФИКАЦИИ

1. Общие сведения.
2. Теоретические основы процессов.
3. Простая перегонка.
4. Ректификация
5. Схемы ректификационных установок

1. Общие сведения

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.

2. Теоретические основы процессов

В простейшем случае исходная смесь состоит из двух компонентов. Такая смесь называется бинарной. Число степеней свободы бинарной смеси

$$C = K + 2 - Ф = 2 + 2 - 2 = 2,$$

где: K - число компонентов (К = 2); $Ф$ - число фаз (Ф = 2).

Состояние системы определяют три независимых параметра: давление p, температура t, концентрация x. При выборе любых двух параметров определяется значение третьего. Следовательно, равновесную зависимость можно представить, используя две переменные величины (p и x, t и x, p и t, x и y).

Жидкие смеси значительно различаются по своим физико-химическим характеристикам.

В зависимости от взаимной растворимости компонентов бинарные смеси можно разделить на смеси с неограниченной растворимостью компонентов, с взаимно нерастворимыми компонентами, с частичной растворимостью компонентов друг в друге.

Смеси с неограниченной растворимостью компонентов по своему поведению делятся на идеальные и реальные (растворы).

Идеальными смесями называют такие, смешение компонентов которых происходит без выделения и поглощения теплоты и без изменения объема смеси.

Рассмотрим бинарную жидкую смесь, состоящую из легколетучего компонента A и труднолетучего B. Давление насыщенного пара чистых компонентов A и B соответственно обозначим P_A и $P_в$.

Идеальные смеси подчиняются закону Рауля, который гласит, что парциальное давление компонента в паре пропорционально мольной доле компонента в жидкости:

$$p_A = P_A x;\ p_в = P_в(1–x), \qquad (16.1)$$

где: p_A и $p_в$ - парциальные давления компонентов A и B; x, $(1 - x)$ - мольные доли компонентов A и B в жидкой смеси.

Общее давление в системе по закону Дальтона равно сумме парциальных:

$$P = P_A x + P_в(1–x) = P_B + (P_A – P_в)x, \qquad (16.2)$$

откуда

$$x = (P – P_в)/(P_A – P_в)$$

Из уравнений (15.1) и (15.2) видно, что при постоянной температуре парциальное давление компонентов и общее давление паров над жидкой смесью находятся в линейной зависимости от мольной доли x легколетучего компонента.

Изотермы парциальных давлений компонентов и общего давления изображены на рисунок 16.1. Прямые OB и CA показывают изменение парциальных давлений компонентов $(p_A$ и $p_в)$, прямая AB — изменение общего давления над раствором. Вертикальные отрезки OA и CB определяют давление насыщенных паров чистых компонентов $(p_в$ и $P_A)$.

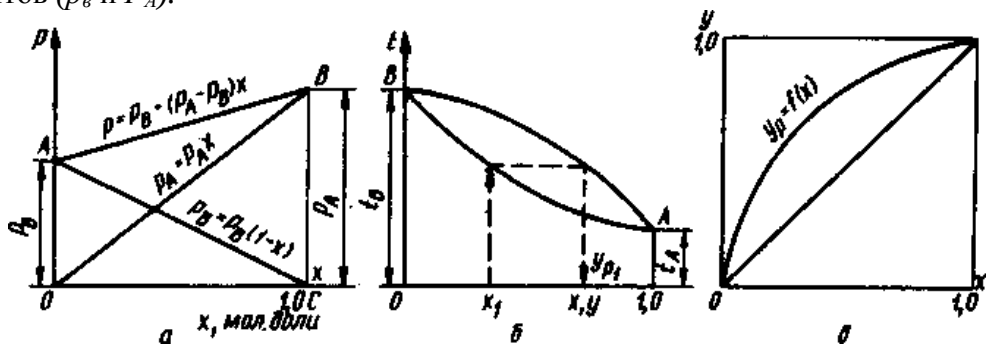


Рисунок 16.1. - Диаграммы равновесия жидкость — пар для идеальных смесей:

а - изотермы парциальных давлений компонентов и общего давления над смесью; *б* - диаграммы t — x, y; *в* - диаграммы y - x

Согласно закону Дальтона парциальное давление компонента в паре пропорционально мольной доле этого компонента в паре:

$$P_A = Py;\ P_B = P(1–y), \qquad (16.3)$$

где: P - общее давление в системе; y, $(1 - y)$ - мольные доли компонентов A и B в паровой смеси.

Для условия равновесия имеем

$$P_A x = Py;\ P_в(1–x) = P(1–y), \qquad (16.4)$$

откуда

$$y = (P_A/P)x \text{ или } 1–y = (p_в/P)(1–x). \qquad (16.5)$$

Обычно процессы перегонки и ректификации проводят в изобарических условиях, поэтому рассмотрим поведение идеальной бинарной смеси при P = const.

В этом случае равновесную зависимость можно представить в координатах t - x, y или y - x. Зная температуры и рассчитав величины x и y, построим диаграмму, характеризующую равновесие в системе. Нижняя кривая на диаграмме (рисунок 16.1,б) определяет температуры кипения жидкой смеси, верхняя - температуры конденсации паровой смеси. Отрезки, отложенные по осям ординат при $x = 0$ и $x = 1{,}0$, определяют температуры кипения соответственно трудно- и легколетучего компонентов.

Для определения состава пара по известному составу жидкости x_1 из точки на оси абсцисс, соответствующей концентрации жидкости, проводят вертикаль до пересечения с линией кипения. Далее из точки пересечения проводят горизонталь до пересечения с линией конденсации пара. Абсцисса точки пересечения определит состав равновесного пара y_{p1}

Из рисунок 16.1,б видно, что при одной и той же температуре кипения концентрация легколетучего компонента в парах больше его концентрации в равновесной с парами жидкости. Это свойство систем жидкость — пар подчиняется первому закону Коновалова: пар обогащается тем компонентом, добавление которого к жидкости повышает давление пара над этой жидкостью или снижает ее температуру кипения.

Для расчетов процессов ректификации более удобно использовать диаграмму *y - x* (рисунок 16.1,в), построенную на основе диаграммы *t - x, y.* Кривая зависимости *y = f(x)* соответствует уравнению

$$y = \frac{P_A x}{P} = \frac{P_A x}{P_B + (P_A - P_B)x}, \qquad (16.6)$$

которое выражает зависимость между равновесными составами жидкой и паровой фаз.

Зная относительную летучесть компонентов $\alpha = P_A/P_B$, можно рассчитать и построить кривую равновесия для идеальных смесей

$$y = \frac{\alpha x}{1 + (\alpha - 1)x}, \qquad (16.7)$$

С жидкостью, состоящей только из легколетучего компонента, находится в равновесии пар, состоящий также только из этого компонента. Соответственно крайние точки кривой равновесия расположены в противоположных углах квадрата. Кривая равновесия и диагональ квадрата ограничивают область существования жидкой и паровой фаз.

Реальные жидкие смеси характеризуются теплотами смешения компонентов, изменением объема при смешении, и их поведение в большинстве случаев не подчиняется закону Рауля. В этих смесях следует учитывать силы взаимодействия молекул паровой фазы, их собственный объем и т. д.

Отклонение от закона Рауля может быть положительным или отрицательным. В случае положительного отклонения общее давление над раствором больше, чем следует по закону Рауля для идеальных смесей, а при отрицательном — меньше. В первом случае линия общего давления проходит выше прямой для идеального раствора, во втором случае - ниже.

Количественные отклонения от закона Рауля могут быть так велики, что ряд смесей при определенных концентрациях имеет постоянную температуру кипения. При этой температуре согласно закону Коновалова состав равновесного пара над жидкой смесью равен составу жидкой смеси, т. е. $y_p = x$ (точка *M* на рисунок 15.2). Такие смеси называют азеотропными. Они могут быть с максимальной или минимальной температурой кипения по сравнению с жидкой смесью других составов.

Состав азеотропных смесей зависит от давления (температуры). Согласно закону Вревского при повышении температуры азеотропной смеси, обладающей максимумом давления пара в смеси, увеличивается относительное содержание того компонента, парциальная мольная теплота испарения которого больше, а для смеси с минимумом

давления пара - содержание компонента, парциальная мольная теплота испарения которого меньше.

Согласно этому закону азеотропная смесь может быть разделена перегонкой или ректификацией путем изменения давления.

Смеси взаимно нерастворимых или ограниченно растворимых жидкостей (взаимно нерастворимыми считаются жидкости, обладающие незначительной растворимостью друг в друге). В случае полной нерастворимости компонентов *A* и *B* силы взаимодействия молекул этих компонентов равны нулю, а каждый из них ведет себя независимо от другого). Такие смеси кипят при давлении $P = P_A + P_B$

При нерастворимости компонентов парциальное давление любого компонента равно давлению его насыщенного пара при той же температуре.

Температура кипения смеси $t_{см}$ не зависит от состава жидкой смеси (линия *abd* на рисунок 15.2).

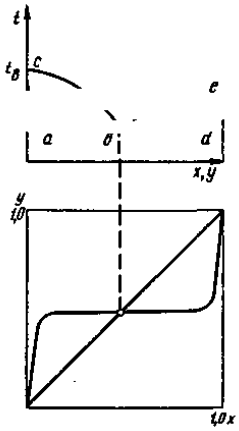


Рисунок 16.2. - Фазовые диаграммы для ограниченно растворимых жидкостей

Температура кипения смеси всегда ниже температур кипения чистых компонентов.

В природе редко встречаются абсолютно нерастворимые друг в друге вещества. При незначительной растворимости одного вещества в другом температура кипения будет меняться по линии *ac* или *de* до температуры кипения основного компонента смеси. Изменение температур конденсации пара будет протекать по линиям *cb* и *eb.* В точке *b* конденсируется пар состава $y_0 = P_A/P$ =const.

3. 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 (рисунок 15.4). 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.

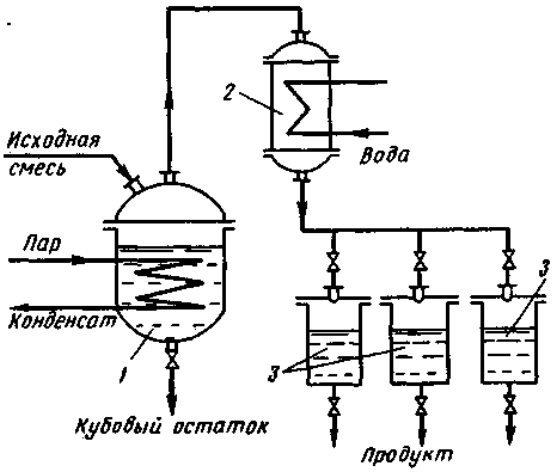


Рисунок 16.4. - Установка для простой перегонки:
1 - куб; *2* - конденсатор; *3* - сборники дистиллята

При испарении смеси содержание легколетучего компонента в дистилляте непрерывно уменьшается от максимального в начале до минимального в конце перегонки. Это позволяет получать несколько фракций дистиллятов различного состава, собирая их в разные сборники. Способ перегонки с разделением смеси на несколько фракций, в различной степени обогащенных летучим компонентом, называется фракционной перегонкой.

При простой перегонке образующийся пар отводится из куба и в каждый данный момент находится в равновесии с оставшейся жидкостью.

При составлении материального баланса простой перегонки допустим, что в некоторый момент времени τ в перегонном кубе находится L кг смеси с концентрацией x низкокипящего компонента. Пусть за бесконечно малый промежуток времени $d\tau$ испарится dL кг. Тогда количество жидкости и состав ее меняются и составляют соответственно $(L - dL)$ и $(x—dx)$. Количество образующегося за этот промежуток времени пара равно уменьшению количества жидкости dL, а его состав y_p является равновесным с x. Содержание летучего компонента в жидкости к началу рассматриваемого промежутка времени составляет Lx, а к концу — $(L - dL)(x - dx)$. Количество же летучего компонента, перешедшего за этот промежуток времени в пар, равно $y_p\,dL$. Таким образом, уравнение материального баланса по летучему компоненту за рассматриваемый промежуток времени может быть записано так:

$$Lx = (L–dL)\,(x–dx) + y_p dL.$$

Раскрывая скобки и пренебрегая членом $dLdx$ как бесконечно малой величиной второго порядка, получим

$$Ldx = (y_p–x)dL;\ dL/L = dx/(y_p–x). \qquad (16.8)$$

В начальный момент перегонки количество жидкости в аппарате равно количеству начальной смеси F (состава x_F), а в конечный момент — количеству остатка W (состава x_w). Таким образом, пределы интегрирования будут для левой части F и W, для правой части x_F и x_W:

$$\int_W^F \frac{dL}{L} = \int_{x_W}^{x_F} \frac{dx}{y_p - x}$$

Интегрируя левую часть, получим

$$ln\frac{F}{W}=\int_{x_W}^{x_F}\frac{dx}{y_p-x}. \qquad (16.9)$$

Вид функции $y = f(x)$ устанавливается экспериментальным путем, поэтому интегрирование правой части уравнения (16.9) проводится графически. Для этого для ряда значений x в пределах от x_F до x_w находят из диаграммы y - x равновесные значения y_p. Строят зависимость $\frac{1}{y_p-x}$ от x и по размеру площади под кривой, ограниченной значениями x_F и x_w, определяют величину искомого интеграла. После этого по уравнению (15.9), зная количество загруженной смеси F, ее концентрацию x_F и концентрацию кубового остатка x_w, определяют количество кубового остатка W.

Средний состав дистиллята определяют из уравнения материального баланса

$$Fx_f = Wx_W + (F - W)x_{d\text{ср}}$$

откуда

$$x_{d\text{ср}}=\frac{Fx_f-Wx_W}{F-W}. \qquad (16.10)$$

Простая перегонка с дефлегмацией (рисунок 16.5) проводится для увеличения степени разделения исходной смеси. В этом случае пары, уходящие из перегонного куба, поступают в дефлегматор, где частично конденсируются. При частичной конденсации образуется флегма, обогащенная труднолетучим компонентом, которая сливается обратно в куб и взаимодействует с выходящими из куба парами.

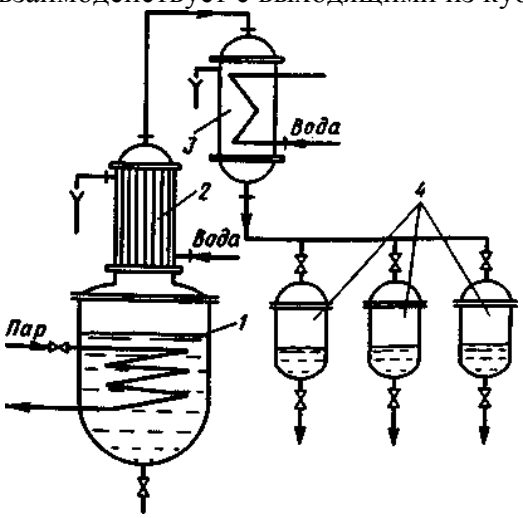


Рисунок 16.5. - Установка для простой перегонки с дефлегмацией:
1 - куб; 2 - дефлегматор; 3 - конденсатор; *4* - сборники

Пары, обогащенные легколетучим компонентом, поступают в конденсатор. Дистиллят собирается в сборниках. Кубовый остаток удаляют из перегонного куба после достижения заданной концентрации x_w.

Перегонку с водяным паром проводят с целью понижения температуры кипения исходной смеси веществ, кипящих при температурах свыше 100 °С, компоненты которой нерастворимы в воде. При такой перегонке отгоняемый компонент получается обычно в виде смеси с водой при температуре кипения или атмосферном давлении — меньшем, чем температура кипения воды.

Общее давление паров над смесью равно сумме давлений чистых компонентов при той же температуре *(P=P_A + P_B)*. Следовательно, при атмосферном давлении парциальное давление водяного пара над смесью P_B=P-P_A<P.

На рисунке 16.6 показана диаграмма для определения температур кипения при перегонке с водяным паром, которая определяется как точки пересечения кривой упругости водяного пара с кривыми упругости различных жидкостей.

По диаграмме температура перегонки бензола с водяным паром при атмосферном давлении составляет 69,5 °С, а при *p* =0,0395 МПа - около 46 °С, толуола при атмосферном давлении - 85 °С.

Схема установки для перегонки с водяным паром показана на рис. 16.7. Исходная смесь загружается в перегонный куб, в рубашку которого подается глухой насыщенный водяной пар. Внутрь куба в исходную смесь барботируется острый водяной пар. Пары, образующиеся при кипении смеси, поступают в конденсатор и далее в сепаратор, где конденсат разделяется. Из сепаратора удаляются вода и нерастворяющийся в воде легколетучий компонент, который собирается в сборнике.

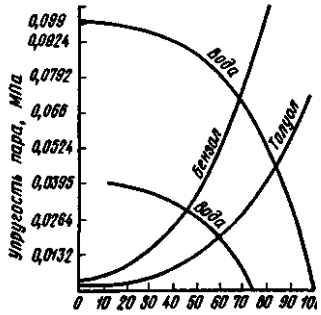


Рисунок 16.6. - Диаграмма для определения температуры кипения при перегонке с водяным паром

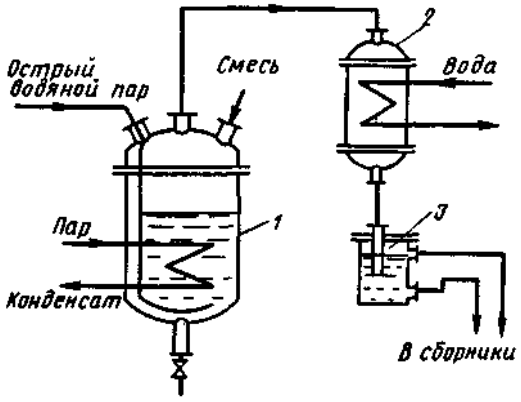


Рисунок 16.7. - Установка для перегонки с водяным паром:
1 - куб; *2* - конденсатор; *3* - сепаратор

Отношение количества отогнанного компонента к количеству водяного пара

$$G_к/G_в = P_к M_к/(P_в M_в), \quad (16.11)$$

где: G_K и G_B - массовые количества соответственно компонента и воды;
Рк и P_B - давления паров соответственно отогнанного компонента и воды;
$M_к$ и $M_в$ - молекулярные массы соответственно компонента и воды.

Парциальное давление водяного пара $p_в = P - \varphi p_к$, где P - общее давление; φ - степень насыщения. Тогда из (15.11)

$$G_В = G_к \frac{(P - \varphi p_к) M_В}{\varphi p_к M_к}. \qquad (16.12)$$

Молекулярная перегонка используется для разделения компонентов, кипящих при высоких температурах и не обладающих необходимой термической стойкостью. Процесс проводится под глубоким вакуумом, соответствующим остаточному давлению 1,31...0,131 Па.

Молекулярная перегонка протекает путем испарения жидкости с ее поверхности. Процесс осуществляется на близрасположенных поверхностях испарения и конденсации, причем расстояние между ними (обычно 20...30 мм) должно быть меньше длины свободного пробега молекул. В этом случае отрывающиеся от поверхности испарения молекулы летучего компонента попадают на поверхность конденсации и конденсируются на ней. Разность температур между поверхностями испарения и конденсации порядка 100 °С.

На рисунке 15.8 показана схема аппарата для молекулярной перегонки.

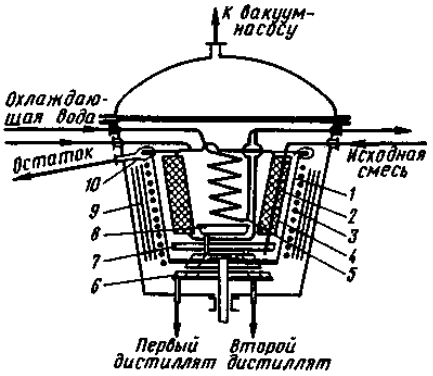


Рисунок 16.8. - Аппарат для молекулярной перегонки:
1 - ротор; *2* - труба для подачи исходной смеси; *3* - электронагреватель; *4,* 5 - первый и второй конденсаторы; *6* - кольцевой сборник; *7, 8* - поддоны под первым и вторым конденсаторами; 9 - концентрическая изоляционная плита; *10* - отводной желоб

Исходная смесь поступает в аппарат через трубу на дно ротора. Под действием центробежной силы поступившая жидкость поднимается в виде тонкой пленки по конусу, Одновременно нагревается излучением от электронагревателя и испаряется. Оторвавшиеся с поверхности испарения молекулы уносятся к поверхностям конденсации. Пары менее летучего компонента конденсируются на поверхности конденсатора 4, а пары более летучих компонентов - на поверхности конденсатора 5. Первая фракция стекает с поверхности конденсатора 4 на поддон 8, а вторая конденсируется на змеевике и стекает на поддон 7. Неиспарившаяся часть жидкости под действием центробежной силы переливается через край ротора в отводной желоб и удаляется из аппарата.

Из поддона 8 дистиллят отводится через периферийную секцию кольцевого сборника, а из поддона 7- через центральную секцию.

4. Ректификация

Ректификация представляет собой разделение смеси на составляющие ее компоненты в результате многократного частичного испарения жидкости и конденсации паров. Проводят ректификацию в колонных аппаратах, снабженных контактными устройствами (тарелками различной конструкции) либо заполненных насадкой, изготовленной из различных материалов (керамика, металл, дерево). Процесс взаимодействия пара с жидкостью происходит в противотоке, и в каждом контактном устройстве пары конденсируются, а жидкость частично испаряется за счет теплоты конденсации пара. Таким образом, пар обогащается легколетучим компонентом, а жидкость, стекающая в низ колонны, — труднолетучим компонентом. В результате многократного взаимодействия пара и жидкости дистиллят содержит почти чистый легколетучий компонент, а кубовый остаток — труднолетучий.

При расчете процессов ректификации принимается, что:

1) при конденсации 1 кмоль пара испаряется 1 кмоль жидкости, следовательно, количество пара, движущегося в ректификационной колонне, одинаково в любом ее сечении;
2) при конденсации пара в дефлегматоре не происходит изменения состава пара, следовательно, состав пара, уходящего из ректификационной колонны, равен составу дистиллята *($y_d = x_d$);*
3) при испарении жидкости не происходит изменения ее состава, следовательно, состав пара, образующегося при испарении, равен составу кубового остатка *($y_w = x_w$).*

Процесс ректификации иллюстрируется *t - x,y* - диаграммой (рисунок 16.9). При нагревании жидкой смеси состава x_1 до температуры кипения t_1 получим пар равновесного состава, после конденсации которого образуется жидкость состава x_2, обогащенная легколетучим компонентом. В результате последующего нагревания этой жидкости до температуры кипения t_2 и конденсации паров получают жидкость состава x_3. Таким образом, проводя многократное испарение жидкости и конденсацию паров, можно разделить исходную смесь на чистые легколетучий и труднолетучий компоненты.

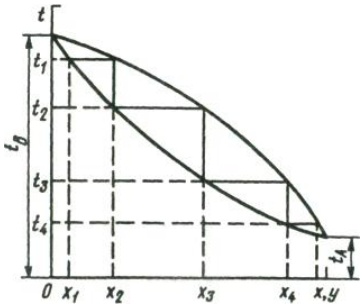


Рисунок 16.9 - t-x, y-диаграмма

Материальный и тепловой балансы ректификации составляют по принципиальной схеме (рисунок 16.10). В колонну ректификационной установки поступает исходная смесь, которая разделяется в результате ректификации на дистиллят и кубовый остаток. Выходящие из колонны пары конденсируются в дефлегматоре и попадают в сосуд *3,* где разделяются на две части: одна часть, так называемая флегма Ф, направляется на орошение колонны, а другая отбирается в виде продукта — дистиллята.

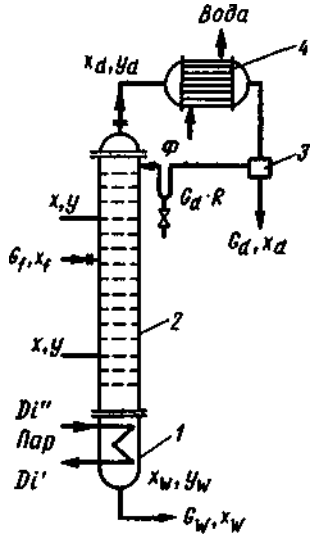


Рисунок 16.10. - К составлению материального и теплового балансов ректификации: *1* - куб; *2* - колонна; *3* - разделительный стакан; *4* - дефлегматор

Материальный баланс описывается следующими уравнениями:

$$G_f = G_d + G_W \tag{16.13}$$

по легколетучему компоненту

$$G_f x_f = G_d x_d + G_W x_W \tag{16.14}$$

где: G_f, G_d, G_w - массы соответственно смеси, поступающей на ректификацию, дистиллята и получаемого остатка, кмоль; x_f,x_d, x_w – концентрации легколетучего компонента соответственно в исходной смеси, дистилляте и в остатке, мольные доли.

Из уравнений (15.13) и (15.14) определяют массы дистиллята и кубового остатка:

$$G_d = G_f \frac{x_f - x_W}{x_d - x_W} \tag{16.15}$$

$$G_W = G_f \frac{x_d - x_f}{x_d - x_W} \tag{16.16}$$

Отнесем массы исходной смеси, кубового остатка и флегмы к 1 кмоль дистиллята и обозначим: $G_f/G_d = F$; $G_w/G_d = W$; $\Phi/G_d = R$.

Последнее отношение называется флегмовым числом.

Тарелка питания разделяет ректификационную колонну на две части: верхнюю, или укрепляющую, и нижнюю — исчерпывающую.

Составим уравнение материального баланса для верхней и нижней частей колонны на основании общего уравнения

$$Gdy = L\,(-dx). \tag{16.17}$$

Количество жидкости, стекающей в укрепляющей части колонны, $L = RG_d$.

Количество паров, поднимающихся по колонне,

$$G = G_d + \Phi = G_d + RG_d = G_d(1 + R) \tag{16.18}$$

Для укрепляющей части колонны запишем

$$(R + 1)dy = R(-dx); \tag{16.19}$$

для исчерпывающей части

$$(R + 1)dy = (F+R)(-dx). \tag{16.20}$$

Запишем уравнение (15.19) для произвольного сечения верхней части колонны, где концентрации x, y, и верхнего, где концентрации x_d, y_d, причем согласно принятому допущению $x_d = y_d$:

$$(R+1)(y_d - y) = (R+1)(x_d - y) = R(x_d - x),$$

откуда

$$y = \frac{R}{R+1}x + \frac{x_d}{R+1} \qquad (16.21)$$

Для произвольного сечения нижней части колонны, где концентрации x и y, и куба, где концентрации жидкости и пара x_w и y_w, из уравнения (15.20) с учетом, что $x_w = y_w$, найдем

$$(R+1)(y-y_w)=(R+1)(y-x_w) = (F+R)(x-x_w) \qquad (16.22)$$

и

$$y = \frac{R+F}{R+1}x - \frac{F-1}{R+1}x_W$$

Зависимости (15.21) и (15.22) представляют собой прямые линии. В уравнении (15.21) $R/(R+1)$ - тангенс угла наклона рабочей линии к оси абсцисс, а $x_d/(R+1)$ - отрезок, отсекаемый рабочей линией на оси ординат диаграммы $y - x$ (рисунок 15.11).

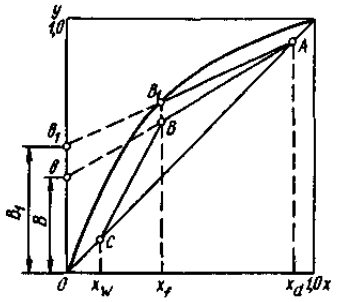


Рисунок 16.11. - Построение рабочих линий ректификации

Уравнения (16.21) и (16.22) являются уравнениями рабочих линий для укрепляющей и исчерпывающей частей ректификационной колонны.

В случае периодической ректификации процесс описывается рабочей линией для верхней исчерпывающей части колонны.

Из уравнения (15.19) для сечения колонны по тарелке питания (x_f y_f) и верха колонны (x_d y_d) получим

$$(R+1)(x_d - y_f) = R(x_d - x_f), \qquad (16.23)$$

откуда

$$R = \frac{x_d - y_f}{y_f - x_f}. \qquad (16.24)$$

Тепловой баланс ректификационной колонны непрерывного действия (рисунок 16.10) выражается равенством

$$Q_1 + G_f c_f t_f + RG_d c_d t_d = G_d (R+1)(r_d - c_d t_d) + G_w c_w t_w + Q_в \qquad (16.25)$$

где: Q_1 - расход теплоты в кубе, Дж/ч; c_f , c_d , c_w - удельные теплоемкости соответственно исходной смеси, дистиллята и кубового остатка, Дж/(кг*К); t_f и t_d, t_w - температуры соответственно исходной смеси, дистиллята и кубового остатка, К; r_d - теплота парообразования дистиллята, Дж/кг; Q_n - потери теплоты в окружающее пространство, Дж/ч.

Из уравнения (15.25) находим расход теплоты в кубе ректификационной колонны

$$Q_1 = G_d (R+1) r_d + G_d c_d t_d + G_W c_W t_W + G_f c_f t_f + Q_п \qquad (16.26)$$

Если кипятильник нагревается водяным паром, расход его на проведение процесса составит

$$D = \frac{Q_1}{i'' - i'}, \qquad (16.27)$$

где: i'', i' - энтальпия соответственно водяного пара и конденсата, кДж/кг.

Рассмотрим построение процесса ректификации для случая питания колонны исходной смесью при температуре кипения.

Рабочие линии на *y* - x - диаграмме строят следующим образом. На оси абсцисс (рисунок 15.11) откладывают концентрации, характеризующие составы жидкостей: x_w , x_f , x_d . Учитывая, что $x_d = y_d$, из точки x_d восстанавливают перпендикуляр и на пересечении его с диагональю находят точку A с координатами $x_d = y_d$. Зная флегмовое число R, определяют отрезок $B = \frac{x_d}{R+1}$ и откладывают его на оси ординат диаграммы. Соединяют конец отрезка B (точка B) с точкой A. Из точки x_f соответствующей заданному составу исходной смеси, проводят вертикаль до пересечения с линией Ab в точке B. Прямая AB является рабочей линией укрепляющей части колонны. Далее из точки x_w восстанавливают перпендикуляр и на пересечении его с диагональю находят точку C. Соединяя точки C и B, получают рабочую линию для исчерпывающей части колонны. Точка B является общей для рабочих линий и характеризует рабочие концентрации в жидкости и паре на тарелке питания.

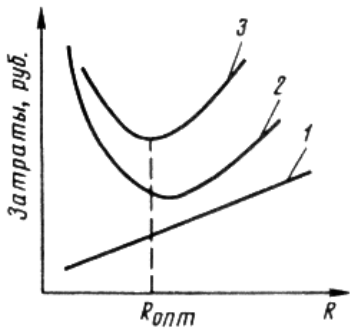
Положение рабочих линий при заданных концентрациях жидкости x_w, x_f , x_d зависит только от величины отрезка B, определяемого значением рабочего флегмового числа R [уравнение (15.24)]. С уменьшением флегмового числа отрезок B увеличивается, и рабочая линия стремится к своему предельному верхнему положению Ab, соответствующему пересечению рабочей и равновесной линий в точке B_1. Очевидно, что в этой точке движущая сила $\Delta y = y_p - y = 0$ и, следовательно, ректификационная колонна должна иметь бесконечно большую поверхность фазового контакта. Действительно, в этом случае число теоретических ступеней изменения концентраций (см. главу 4.1) будет бесконечным и разделение смеси возможно только в условной колонне бесконечной высоты. При этом расход греющего пара и диаметр колонны будут минимальными. Флегмовое число при этом также будет минимальным и равным

$$R_{min} = \frac{x_d - y_{fp}}{y_{fp} - x_f}. \qquad (16.28)$$

Второму нижнему предельному положению рабочей линии соответствует бесконечно большое флегмовое число и соответственно отрезок $B = 0$. В этом случае обе рабочие линии совпадают с диагональю. Бесконечно большому флегмовому числу соответствует максимальная движущая сила процесса $\Delta y_{max} = y_p - y$ и, следовательно, наименьшее число теоретических ступеней изменения концентрации и минимальная высота колонны. Однако расход пара в колонне, расход греющего пара в кипятильнике, диаметр колонны, а также расход охлаждающей воды в дефлегматоре будут максимальными. В этих условиях ректификационная колонна работает без отбора дистиллята, «сама на себя», что имеет место только при выводе колонны на рабочий режим.

Рациональный выбор рабочего флегмового числа представляет собой достаточно сложную задачу, однако необходим, так как от флегмового числа зависят размеры (высота, диаметр) ректификационной колонны, а следовательно, капитальные и эксплуатационные расходы, а также энергозатраты.

На рисунке 16.12 приведены изменения статей расхода на ректификацию в зависимости от величины флегмового числа.



Рисунке 16.12. - Зависимость статей расхода на ректификацию от величины флегмового числа:
1 - эксплуатационные затраты; *2* - капитальные затраты; *3* - суммарные затраты

Эксплуатационные расходы, определяемые в основном расходом пара и воды, возрастают прямо пропорционально величине флегмового числа. Зависимость капитальных затрат от величины флегмового числа обратно пропорциональна высоте и диаметру колонны. Некоторому значению флегмового числа соответствует минимум капитальных затрат. Зависимость суммарных затрат от флегмового числа также имеет минимум. Этому минимуму соответствует оптимальное значение рабочего флегмового числа.

Рабочее флегмовое число:

$$R_p = \sigma R_{min} \qquad (15.29)$$

где: σ - коэффициент избытка флегмы.

Во многих случаях коэффициент избытка флегмы принимается с учетом изложенного в пределах $\sigma = 1{,}1\ldots1{,}4$

Рабочие линии при периодической ректификации изображаются на *y* — x-диаграмме (рисунке 16.13). Процессы периодической ректификации могут проводиться при постоянном флегмовом числе либо при постоянном составе дистиллята.

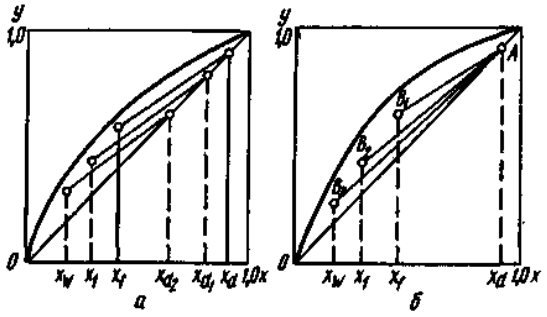


Рисунок 16.13. - Изображение рабочих линий при периодической ректификации:
а - при постоянном флегмовом числе; *б* - при переменном флегмовом числе

В случае ректификации при постоянном флегмовом числе содержание легколетучего компонента в кубе и дистилляте постепенно уменьшается. В результате, как и в случае фракционной перегонки, получают дистиллят в виде нескольких фракций.

При постоянном флегмовом числе наклон рабочих линий не зависит от концентраций. Пусть в первый момент ректификации концентрация летучего компонента в кубовой жидкости x_f , а в дистилляте x_d (рисунок 16.13,а). В результате

ректификации концентрация летучего компонента в кубе будет уменьшаться, и принимать значения x_1, x_2 и т. д. вплоть до конечной концентрации x_w. Соответственно будет уменьшаться и концентрация легколетучего компонента в дистилляте: x_{d1}, x_{d2}, x_{d3} и т. д. В итоге будет получен дистиллят среднего состава

$$x_{d\,\text{ср}} = \frac{1}{x_f - x_W}\int_{x_W}^{x_f} f(x)dx \qquad (16.30)$$

Для получения постоянного состава дистиллята процесс ректификации проводят при изменяющемся флегмовом числе: минимальном в начале процесса и максимальном в конце. Увеличение флегмового числа соответствует уменьшению отрезка B и, следовательно увеличению наклона рабочей линии. Рабочая линия будет занимать последовательно положения AB_1, AB_2, AB_3 и т. д. (рисунок 16.13, б).

Расчет числа тарелок и рабочей высоты ректификационной колонны часто ведут по числу теоретических или действительных ступеней изменения концентраций. При этом предполагается, что в теоретической ступени достигается равновесие между паром, уходящим на вышерасположенную ступень (тарелку), и жидкостью, стекающей со ступени (тарелки) на нижерасположенную.

Рассмотрим принцип работы барботажной тарелки (рисунок 16.14, *а*). Пусть на n-ю тарелку поступает с вышерасположенной жидкость концентрацией x_{n+1} а с нижерасположенной тарелки - пар концентрацией y_{n-1} .В результате массообмена легколетучий компонент из жидкости переходит в пар, а труднолетучий - из пара в жидкость. Концентрация легколетучего компонента в паре возрастает до y_n, а в жидкости уменьшается с x_{n+1} до x_n.

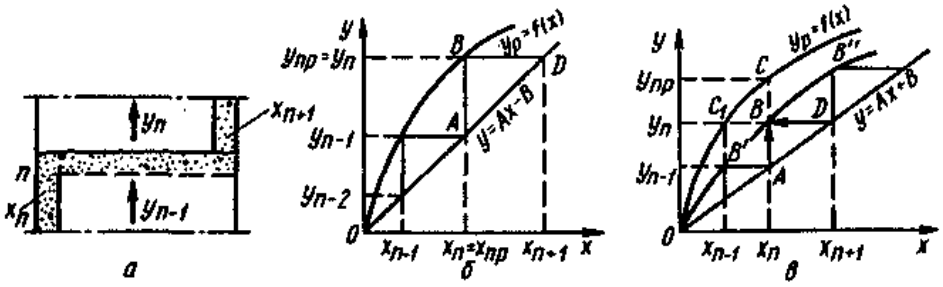


Рисунок 16.14. - К расчету числа ректификационных тарелок:
а - схема взаимодействия пара и жидкости на тарелке; *б* - изображение процесса в y - x-диаграмме в случае достижения равновесия между паром и жидкостью; *в* - изображение процесса в y - x-диаграмме в случае, когда равновесие между паром и жидкостью на тарелке не достигается

При рассмотрении процесса примем следующие широко распространенные допущения: жидкость на тарелке идеально перемешана и имеет постоянную концентрацию x_n, а пар меняет свою концентрацию в слое жидкости от y_{n-1} до y_n в режиме идеального вытеснения.

В случае достижения равновесия процесс изменения концентрации в паре от y_{n-1} до $y_n = y_{np}$ изображается вертикальным отрезком AB, а изменение концентрации в жидкости от x_{n+1} до x_n - горизонтальным отрезком BD (рисунок 15.14, б). Таким образом, ступенька ABD изображает процесс, происходящий на одной теоретической тарелке.

Чтобы определить, сколько теоретических тарелок требуется установить в колонне для разделения исходной смеси в заданных пределах от x_f до x_w и от x_f до x_d, вписывают

между линией равновесия и рабочими линиями между точками *A* и *C* ступенчатую линию. Число полученных ступеней и определит число теоретических тарелок.

На реальной ступени (тарелке) изменения концентрацией никогда не достигается равновесие, т. е. $y_n < y_{np}$ (рисунок 15.14, в).

Для определения числа действительных тарелок используют коэффициент полезного действия, величина которого определяется опытным путем.

Для расчета коэффициентов массоотдачи в фазах можно рекомендовать следующие уравнения:

в жидкой фазе

$$Nu_{\text{д.ж}} = 540\ Re_{\text{ж}}^{0,33}\ Pr_{\text{д.ж}}^{0,45} \qquad (16.31)$$

в газовой фазе для ситчатых тарелок

$$Nu_{\text{д.ж}} = 2,5 Re_r^{0,72}\ Pr_{\text{д.г}}^{0,5}\ We^{-0,25} \qquad (16.32)$$

то же для колпачковых тарелок

$$Nu_{\text{д.г}} = 0,265 Re_r\ Pr_{\text{д.г}}^{0,5}\ We^{-0,25} \qquad (16.33)$$

В уравнениях (15.32) и (15.33) линейным размером в критериях $Nu_{\text{д.г}}$ и $\text{Re}_{\text{г}}$ является капиллярная константа $X = \sqrt{(\sigma/\rho_{ж})g}$.

Критерий Вебера $We = (\sigma/\rho_{ж})h_{\text{ст}}^2 g$, где σ - поверхностное натяжение, Н/м; $h_{\text{ст}}$ - высота статического слоя жидкости на тарелке, м.

5. Схемы ректификационных установок

Любая ректификационная установка состоит из колонной части, в которой расположены тарелки или насадка, и кипятильника (куба), представляющего собой кожухотрубчатый или змеевиковый теплообменник. Кипятильник может быть встроенным в нижнюю колонную часть либо вынесенным за пределы колонны.

Ректификационная установка непрерывного действия показана на рисунке 15.15.

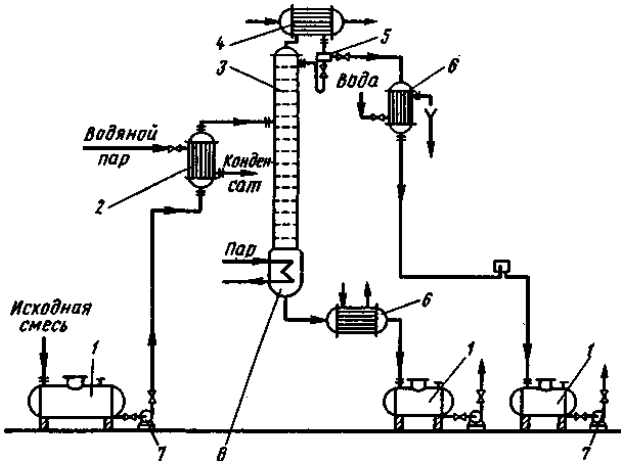


Рисунок 16.15. - Ректификационная установка непрерывного действия:
1 - сборники; 2 - подогреватель; 3 - ректификационная колонна; 4 - дефлегматор; 5 - разделительный сосуд; 6 - холодильники; 7 - насосы; 8 - кипятильник

Исходная смесь, нагретая в подогревателе, подается на тарелку питания ректификационной колонны и за счет теплоты, поступающей из кипятильника, разделяется в результате ректификации на дистиллят и кубовый остаток. Пары, выходящие из колонны, конденсируются полностью или частично в дефлегматоре. В

случае полной конденсации паров полученный дистиллят в разделительном сосуде разделяется на две части. Одна часть - флегма через гидрозатвор поступает на орошение колонны на верхнюю тарелку, вторая часть - дистиллят охлаждается в холодильнике и направляется в сборник.

В случае неполной конденсации паров в дефлегматоре они поступают в конденсатор-холодильник, где конденсируются и охлаждаются. Кубовый остаток в зависимости от его ценности либо собирается в емкости, либо как сточные воды направляется на утилизацию.

На практике часто встречаются случаи разделения исходной смеси на три и более части. Так в спиртовом производстве из бражки выделяют этиловый спирт, эфироальдегидную фракцию и сивушные масла.

Ректификационная установка для разделения многокомпонентной смеси показана на рисунке 16.16. Установка многоколонная, предназначена для непрерывного разделения исходной смеси на три части: *A, B* и *C.*

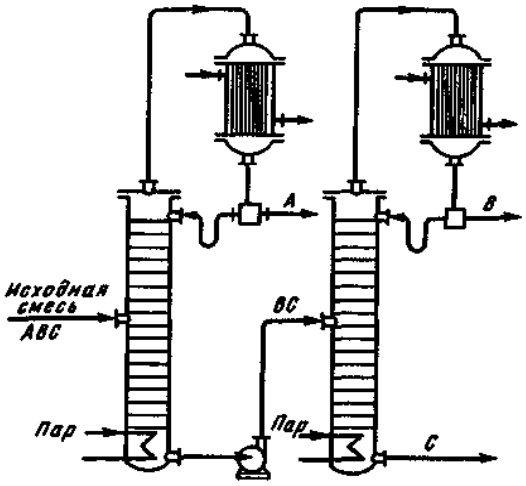


Рисунок 16.16. - Ректификационная установка для разделения многокомпонентной смеси

Первая колонна обеспечивает разделение смеси на *A+BC* или *AB+C.* Для последующего разделения смеси на *n* частей требуется ректификационная установка, состоящая из n - 1 ректификационных колонн.

Ректификационная установка периодического действия, используемая в малотоннажных производствах, показана на рисунке 16.17. Исходная смесь загружается в кипятильник, который обогревается насыщенным водяным паром. После нагрева смеси до температуры кипения ее пары поступают в нижнюю часть ректификационной колонны. Поднимаясь по колонне, пары обогащаются легко летучим компонентом и поступают в дефлегматор, в котором конденсируются. Как и при непрерывной ректификации, конденсат разделяется на флегму и продукт, который после охлаждения в холодильнике собирается в сборнике. После извлечения продукта кубовый остаток сливают и загружают в куб новую порцию исходной смеси.

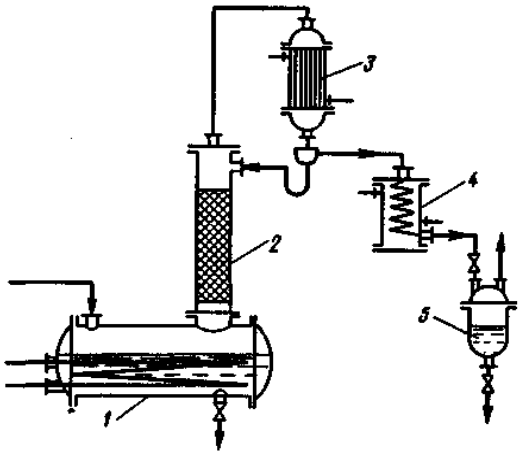


Рисунок 16.17. - Ректификационная установка периодического действия:
1 - кипятильник; 2 - колонна; 3 - дефлегматор; 4 - холодильник; 5 – сборник

Вопросы для самоконтроля

1. Какие методы применяют для разделения жидких однородных смесей? На каких свойствах жидких смесей основаны эти методы разделения?
2. В чем заключаются различия в поведении идеальных и реальных жидких смесей?
3. Что такое простая перегонка? При разделении каких смесей ее применяют?
4. Какие разновидности простой перегонки применяются в пищевой технологии?
5. В чем заключается процесс ректификации?
6. Какие допущения принимают при расчете процессов ректификации?
7. Как определяют рабочее флегмовое число?
8. 10. Какие конструкции ректификационных колонн применяют в пищевой технологии? В чем заключается различие в их работе?

Список литературы

Основная

1. Машины и аппараты пищевых производств: в 3 кн. Кн. 1/ред. В.А. Панфилов. - М.: КолосС, 2009. - 610 с.- ISBN 978-5-9532-0509-2
2. Машины и аппараты пищевых производств: в 3 кн. Кн. 3/ред. В.А. Панфилов. - 2-е изд., доп. и перераб. - М.: КолосС, 2009. - 551 с. ISBN 978-5-9532-0754-6
3. Процессы и аппараты пищевых производств: учебник для вузов. В 2-х кн. Кн. 2 / А.Н. Остриков, Ю.В. Красовичкий, А.А. Шевцов; ред. А.Н. Остриков. - СПб.: ГИОРД, 2007. - 608 с. ISBN 978-5-98879-051-8
4. Процессы и аппараты пищевых производств: учебник / Ю.М. Плаксин, Н.Н. Малахов, В.А. Ларин. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: КолосС, 2007. - 760 с. ISBN 978-5-9532-0581-8

Дополнительная

1. Процессы и аппараты пищевой технологии: учебник/Г.Д. Кавецкий, Б.В. Васильев. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Колос, 2000. - 551 с.
2. Процессы и аппараты пищевых производств: учебник / В.И. Горбатюк. - М.: Колос, 1999. - 330 с.

Лекция 17
ПРОЦЕСС ЭКСТРАКЦИИ

1. Общая характеристика процесса экстракции.
2. Экстракция в системе жидкость-жидкость.
3. Экстрагирование в системе твердое тело – жидкость.
4. Аппаратурное оформление процесса экстракции.

1. Общая характеристика процесса экстракции

Экстра́кция (от лат. extraho — извлекаю) — метод извлечения вещества из раствора или сухой смеси одного или нескольких компонентов с помощью подходящего растворителя (экстраге́нта), обладающего избирательной растворимостью. Движущей силой процесса является разность концентраций. Для извлечения из раствора применяются растворители, не смешивающиеся с этим раствором, но в которых вещество растворяется лучше, чем в первом растворителе. Это один из массообменных процессов пищевой промышленности. Используется для извлечения, разделения и концентрирования растворенных веществ. Под избирательной растворимостью понимается способность жидкости растворять только тот компонент, который следует извлечь.

Экстракция применяется в химической, нефтеперерабатывающей, пищевой, металлургической, фармацевтической и других отраслях, в аналитической химии и химическом синтезе.

Экстракция может быть разовой (однократной или многократной) или непрерывной (перколя́ция). Простейший способ экстракции из раствора — однократная или многократная промывка экстрагентом в делительной воронке. Делительная воронка представляет собой сосуд с пробкой и краном для слива нижнего слоя жидкости. Для непрерывной экстракции используются специальные аппараты — экстракторы, или перколяторы.

К основным стадиям экстракции жидкости относятся: 1) приведение в контакт и диспергирование фаз; 2) разделение или расслаивание фаз на экстракт (извлекающая фаза) и рафинат (исчерпываемая фаза); 3) выделение целевых компонентов из экстракта и регенерация экстрагента, для чего наряду с дистилляцией наиболее часто применяют реэкстракцию (процесс, обратный экстракции жидкости), обрабатывая экстракт водными растворами веществ, обеспечивающих полный перевод целевых компонентов в раствор или осадок и их концентрирование; 4) промывка экстракта для уменьшения содержания и удаления механически захваченного исходного раствора.

2. Экстракция в системе жидкость-жидкость

Экстрагенты обеспечивают переход целевых компонентов из исчерпываемой (тяжелой) фазы, которая чаще всего представляет собой водный раствор, в извлекающую (легкую) фазу (обычно орг. жидкость). Две контактирующие жидкие фазы и распределяемый между ними целевой компонент образуют экстракционную систему. Извлекающая фаза включает только экстрагент (или смесь экстрагентов) либо является раствором одного или нескольких экстрагентов в разбавителе, служащем для улучшения физ. (вязкость, плотность) и экстракционных свойств экстрагентов. Таким образом, экстракцию из жидких систем можно представить следующим образом. Допустим в жидкости ***A*** растворен компонент В. Это означает, что имеется двухкомпонентный раствор ***A+B***. Если к этому раствору добавить растворитель

(экстрагент) ***Д***, который не растворяется и не смешивается с жидкостью ***А***, но хорошо растворяет в себе компонент ***В***, то компонент ***В*** будет переходить в растворитель. Концентрация компонента ***В*** в жидкости ***А*** при этом будет уменьшаться. В реальных условиях компонент ***В*** не полностью перейдет в экстрагент ***Д***. Какая-то часть его останется в жидкости ***А***. Т.О., компонент ***В*** будет находиться в жидкости ***А*** и в экстрагенте ***Д***. В качестве разбавителей используют, как правило, жидкости (керосин, бензол, хлороформ и др.) либо их смеси, которые в исчерпываемой фазе практически нерастворимы и инертны по отношению к извлекаемым компонентам раствора. Иногда к разбавителям добавляют модификаторы, повышающие растворимость экстрагируемых компонентов в извлекающей фазе или облегчающие расслаивание фаз (спирты, кетоны, трибутилфосфат и т.д.).

Распределение компонента В в жидкости А и в экстрагенте Д характеризуется следующим соотношением

$$\varphi = c_{Д} / c_{А} \ , \qquad (17.1)$$

где φ - коэффициент распределения, определяемый опытным путем и зависящий от свойств жидкой системы, температуры и концентрации, $c_{Д}$ - концентрация компонента В в растворителе Д, кг/кг, $c_{А}$ -т концентрация компонента В в жидкости А, кг/кг. Эффективность экстрагирования увеличивается с повышением значения φ. Оно должно быть больше единицы. На практике принято считать, что если φ незначительно превышает 1, то экстрагент подобран неправильно.

Существует понятие **степень экстракции**. Степень экстракции (процент экстракции) - это отношение количества экстрагированного вещества к общему (начальному) количеству этого вещества в водном растворе:

$$R = \frac{A \cdot 100}{N}, \qquad (17.2)$$

где R - степень экстракции вещества, %; A - количество вещества, которое экстрагировалось органическим растворителем; N - общее (начальное) количество вещества в водном растворе.

Количество вещества А, которое экстрагируется органическим растворителем, можно определить экспериментальным путем, применив соответствующий метод количественного определения. Зная начальное количество вещества и количество этого вещества, перешедшего в органический растворитель, рассчитывают степень экстракции.

Степень экстракции вещества можно определить не только экспериментальным путем, но и путем соответствующих расчетов, зная константу или коэффициент распределения вещества, а также отношение объемов водной фазы и фазы органического растворителя. Степень экстракции с указанными величинами связана следующим соотношением:

$$R = \frac{P_0 \cdot 100}{P_0 + V_В / V_О}, \qquad (17.3)$$

где R - степень экстракции; P_0 - константа распределения; $V_В$ - объем водной фазы, мл; $V_О$ - объем фазы органического растворителя, мл.

В формуле (10.3) отношение объема водной фазы к объему фазы органического растворителя заменяют величиной r:

$$r = V_в / V_о , \quad (17.4)$$

Объем органического растворителя, необходимого для экстракции, рассчитывают по формуле

$$V_о = V_в / r , \quad (17.5)$$

После соответствующего преобразования формулы (14.3) степень экстракции рассчитывают по уравнению

$$R = \frac{P_0 \cdot 100}{P_0 + r}, \quad (17.6)$$

Из формулы (14.6) можно рассчитать величину r:

$$r = \frac{P_0 \cdot (100 - R)}{R}, \quad (17.7)$$

Если известна степень экстракции R и отношение объемов фаз r , то константу распределения P_0 можно рассчитать при помощи следующего уравнения:

$$P_0 = \frac{R \cdot r}{100 - R}, \quad (17.8)$$

На основании числовых значений константы распределения и степени экстракции можно рассчитать ряд других количественных характеристик процессов экстракции.

Основные требования к промышленным экстрагентам: высокая избирательность; высокая экстракционная емкость по целевому компоненту; низкая растворимость в рафинате; совместимость с разбавителями; легкость регенерации; высокая химическая, а в ряде случаев и радиационная стойкость; негорючесть или достаточно высокая температура вспышки (более 60 °С); невысокая летучесть и низкая токсичность; доступность и невысокая стоимость.

Наибольшее распространенные промышленные экстрагенты подразделяют на след. классы: 1) нейтральные, извлечение которыми осуществляется по разным механизмам в зависимости от кислотности исходного раствора, вода, фосфорорганические соединения, нефтяные сульфоксиды, насыщенные спирты, простые и сложные эфиры, альдегиды, кетоны и др.; 2) кислые, которые извлекают катионы металлов в органическую фазу из водной, фосфорорганические кислоты, карбоновые и нафтеновые кислоты, сульфокислоты, алкилфенолы, хелатообразующие соединения (гидроксиоксимы, алкилгидроксихинолины, дикетоны); 3) основные, с помощью которых извлекают анионы металлов из водных растворов, первичные, вторичные, третичные амины и их соли, соли четвертичных аммониевых, фосфониевых и арсониевых оснований и др.

Требования, предъявляемые к органическим растворителям для экстракции. К органическим растворителям, применяемым для экстракции, предъявляется ряд требований.

1. Органический растворитель должен хорошо извлекать исследуемое вещество из водной фазы.

2. Желательно, чтобы применяемый растворитель был избирательным или селективным. Он должен извлекать из растворов только одно вещество или группу родственных соединений.

3. Растворитель должен иметь незначительную растворимость в воде, а вода не должна заметно растворяться в этом растворителе.

При использовании для экстракции органических растворителей, растворяющихся в воде или растворяющих воду, конечные объемы фаз после взбалтывания не будут равны начальным объемам этих фаз. Это может быть источником ошибок при расчетах константы и коэффициента распределения, а также при вычислении степени экстракции. Чтобы исключить возможные ошибки при расчетах, органический растворитель насыщают водой, а воду — органическим растворителем. Только после этого производят экстракцию.

4. Органический растворитель по возможности не должен быть низкокипящим. Температура кипения растворителя должна быть выше 50 °С. Низкокипящие органические растворители даже при комнатной температуре быстро улетучиваются. Поэтому при экстракции их объемы уменьшаются, а концентрация экстрагированных веществ в этих растворителях увеличивается. Это может быть одним из источников ошибок при расчетах константы или коэффициента распределения экстрагируемого вещества. Однако низкая температура кипения органических растворителей является положительным фактором с точки зрения регенерации их после экстракции.

5. Плотность органических растворителей по возможности должна отличаться от плотности воды и водных растворов. При большой разности плотностей указанных жидкостей разделение фаз происходит быстро.

6. Растворители не должны быть огнеопасными или ядовитыми.

3. Экстрагирование в системе твердое тело – жидкость

Под экстрагированием в системе твердое тело – жидкость понимаются процессы растворения, выщелачивания, а также непосредственно процесс экстрагирования, в результате проведения которых извлекается один или несколько целевых компонентов из твердой фазы на основе их избирательной растворимости в жидком растворителе. Процесс проходит через следующие стадии:

1) подвод экстрагента (растворителя) к поверхности раздела твердой и жидкой фаз;
2) перенос экстрагента к целевому компоненту, находящемуся в твердом материале;
3) взаимодействие растворителя в результате проведения химической реакции или физического растворения с извлекаемым компонентом;
4) перенос извлеченного компонента к границе раздела твердой и жидкой фаз;
5) отвод целевого компонен6та в ядро потока растворителя (экстрагента).

При экстрагировании растворимых веществ из ткани растительного сырья обычно не все перечисленные выше стадии имеют место, либо не все играют существенную роль.

Механизм экстаригирования зависит от того, в каком фазовом состоянии находится извлекаемый ценный компонент в твердом теле-носителе. (*Например, если целевой компонент находится в твердом теле в виде раствора, то процесс экстрагирования сводится к внутренней диффузии молекул целевого компонента к наружной поверхности частиц, а затем к переходу в ядро потока жидкости в результате внешней диффузии. Если же целевой компонент содержится в твердых частицах в виде твердых включений, то предварительно происходит растворение этих частиц, а затем перенос растворенного компонента к поверхности частицы и в ядро потока жидкости. Так в самом многотоннажном из пищевых производств, связанных с экстрагированием – свеклосахарном, экстрагирование происходит из растительной ткани, в которой экстрагируемое вещество находится в жидкой фазе уже в растворенном состоянии).*

Эффективность процесса экстрагирования из твердого продукта обеспечивают следующие основные условия:

1. Правильный выбор типа растворителя. Растворитель должен извлекать из продукта только нужный компонент без посторонних примесей. Экстрагент не должен вызывать коррозии аппаратуры. Растворитель должен полностью удаляться из экстрагируемого продукта. (В пищевой промышленности в качестве экстрагента используют воду, бензин, этиловый спирт, ацетон, дихлорэтан).
2. Достижение необходимой степени измельчения продукта, что приводит к увеличению поверхности контакта его с экстрагентом. Желательно, чтобы размер частиц был одинаковым.
3. Создание оптимальных температурных условий. Повышение температуры продукта приводит к увеличению скорости внутренней диффузии и интенсификации всего процесса экстагирования.
4. Создание нужного давления. Повышение давления приводит в увеличению выхода экстрагируемых веществ, но следует помнить, что повышение давления приводит к необходимости использования сложной , герметически закрытой и прочной аппаратуры.
5. Достаточное количество растворителя. Используемое количество экстрагента должно быть оптимальным, т.е. если его будет слишком много, то возможно экстрагирование примесей. Если экстрагента будет меньше, то экстрагируемый компонент не будет полностью извлечен, что приведет к нежелательным потерям сырья.
6. Соблюдение оптимальной продолжительности процесса экстрагирования. При увеличении продолжительности процесса повышается выделение экстрагируемого компонента, но понижается производительность процесса.

Продолжительность процесса определяется скоростью процесса, которая зависит от большого числа параметров – от формы нахождения извлекаемого компонента, характера взаимодействия твердого носителя с извлекаемым компонентом, различия в избирательной способности экстрагента по отношению к компонентам, содержащимся в твердой фазе, от кинетики процесса, которая определяется скоростью протекания самой медленной стадией – подвода и отвода растворителя и экстрагированного ценного компонента, от структуры пористого материала.

4 Вопрос

Известно множество конструкций экстракторов для систем жидкость – жидкость, обусловленных различием режимов технологических процессов.

Эффективность работы аппаратов при прочих равных условиях зависит от совершенства контактирования жидкой исходной смеси и экстрагента, а также от четкости разделения полученной гетерогенной смеси на экстаркт и рафинат. Большая поверхность контакта достигается диспергированием одной из жидких фаз (экстрагента или исходной смеси), а четкость разделения (расслоения) – обособленными гравитационными отстойниками, совмещением специальных расслаивающих устройств со смесительными в одном корпусе, созданием центробежных сил. К экстракторам предъявляются требования: высокая удельная производительность, простота и надежность конструкции, малая металлоемкость, низкий расход энергии.

Экстракторы делят на аппараты периодического и непрерывного действия Их классифицируют по способу контакта взаимодействующих потоков (фаз) на две большие группы.

К первой группе относятся секционные (ступенчатые) аппараты, характеризующиеся многоконтактным межфазным контактом. Ко второй группе принадлежат аппараты с непрерывным контактом взаимодействующих потоков на всем пути их движения. Простейшим одноступенчатым смесительно-отстойным экстрактором является аппарат с мешалкой. После перемешивания исходной смеси и экстрагента, мешалку останавливают, предоставляя смеси жидкости возможность расслаиваться. Камеры могут располагаться обособлено и соединяться трубопроводом либо располагаться в одном корпусе (рисунок 17.1). Полученные экстракт и рафинат выгружают и процесс повторяется.

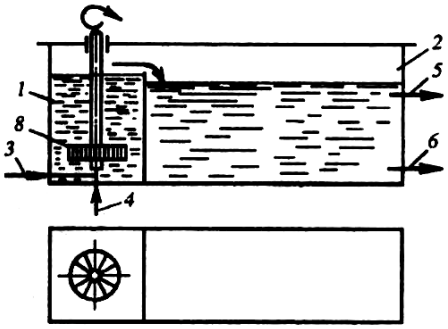


Рисунок 17.1 – Одноступенчатый смесительно-отстойный экстрактор с совмещенными камерами
1 – смесительная камера; 2 – отстойная камера; 3 – исходная смесь;
4 – экстрагент; 5 – экстракт; 6 – рафинат; 8 – турбинная мешалка.

Рассмотрим схему процесса экстракции путем однократного контакта (рисунок 17.2).

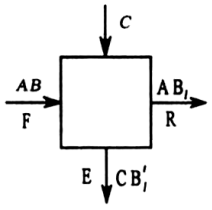


Рисунок 17.2 – Схема однократного контакта
A – жидкость, в которой растворено экстрагируемое вещество; C – растворитель (экстрагент); E – экстракт; B – экстрагируемое вещество; R – рафинат; F – исходная смесь; AB – состав исходной смеси (F) на входе в аппарат; AB_1 – состав рафината (R); CB'_1 – состав экстракта (E)

В результате однократного контакта образуются два слоя: экстрактный и рафинатный, содержащий меньшее количество компонента B, чем исходная смесь F. Если рафинат удалить из аппарата и вновь обработать его свежим растворителем, то при этом содержание компонента B в рафинате будет еще меньше. Таким образом, будет осуществляться принцип многократного контактирования, позволяющий практически полностью выделить продукт B.

Рассмотрим схему многократного контакта (рисунок 17.3).

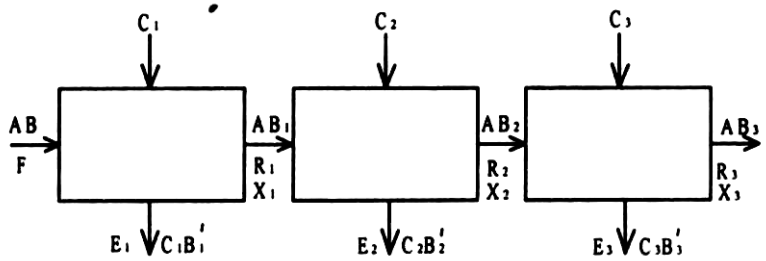


Рисунок 17.3 – Схема многократного контакта с подачей свежего растворителя в каждую степень

A – жидкость, в которой растворено экстрагируемое вещество; C – экстрагент; B – экстрагируемое вещество; E – экстракт; R – рафинат; F – исходная смесь.

Из графического представления экстракции в тройной диаграмме с подачей свежего растворителя в каждую ступень видно, что после трехступенчатой экстракции в рафинате R остается незначительное количество извлекаемого компонента B. Наибольшая степень разделения достигается на первой ступени, сильно уменьшаясь на последующих. Экстракция в каждой ступени может быть проведена различными количествами растворителя. При большем числе ступеней можно получить практически чистый компонент A, и таким образом, трехкомпонентная смесь ABC делится на компонент A и смесь BC.

С помощью многоступенчатой экстракции можно добиться любой степени чистоты рафината, но при этом получить ряд неиспользуемых продуктов (слабых экстрактов). Однако такие продукты можно направить на предыдущие ступени и организовать противоточный процесс с нормальным материальным балансом (рисунок 10.4).

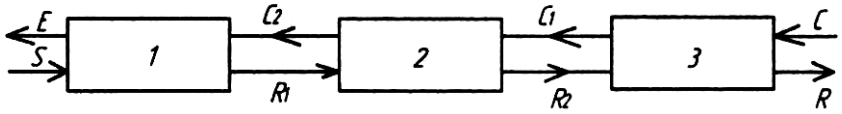


Рисунок 17.4 – Схема процесса противоточной многоступенчатой экстракции.

4. Аппаратурное оформление процесса экстракции

Аппаратурное оформление процесса экстрагирования в системах твердое тело-жидкость определяется физическими свойствами перерабатываемого твердого материала и экстрагента – размерами частиц, их механической прочностью, размерами пор и характером распределения в них извлекаемого вещества, плотностью жидкой и твердой фаз. Имеет значение учет требований к степени обработки материала, к выходной концентрации экстракта.

К конструкциям аппаратов предъявляют следующие требования:

1. высокая производительность на единицу рабочей вместительности аппарата;
2. высокая концентрация образующегося раствора;
3. низкий расход энергии.

Аппараты можно классифицировать по направлению движения экстрагента и твердой фазы (противоточные, прямоточные и комбинированные), характеру циркуляции растворителя (с однократным прохождением, с рециркуляцией и оросительные), параметрами процесса (работающие под атмосферный давлением, под вакуумом или под избыточном давлением), свойствам обрабатываемого твердого

материала (для тонкодисперсных, мелкодисперсных, крупнозернистых, пастообразных, волокнистых и др.), гидродинамическому характеру процесса (с неподвижным, движущимся, взвешенным или псевдоожиженным слоем твердой фазы).

Наиболее распространенные конструкции, рисунок 17.5.

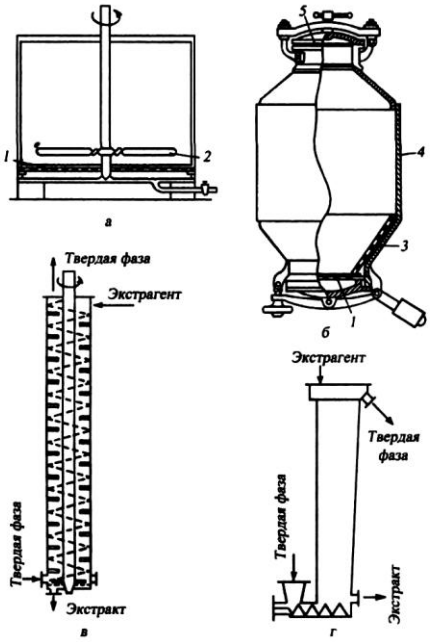


Рисунок 17.5 – Экстракционные аппараты:
а – экстрактор периодического действия с мешалкой; б – диффузор (перколятор); в – колонный аппарат со шнековым транспортером;
г – колонный аппарат без транспортного устройства;
1, 3 – ложное дно; 2 – мешалка; 4 – корпус; 5 – крышка.

Экстрактор периодического действия представляет собой емкость с ложным дном, играющим роль фильтрующей перегородки, в которую единовременно загружается перерабатываемый материал и экстрагент. Аппарат снабжается мешалкой. По окончании экстрагирования экстракт через ложное дно сливается из аппарата, а твердая фаза выгружается. В таких аппаратах получают настойки, морсы, проводят обезжиривание костей, экстракцию желатина.

В аппаратах полунепрерывного действия (перколяторах) частицы твердого материала образуют неподвижный зернистый слой, опирающийся на ложное дно, покрытое фильтрующим материалом, а растворитель непрерывно пропускают через слой. Обычно процесс ведется в батарее, состоящей из 10-15 аппаратов, соединенных последовательно. По мере обеднения твердого материала, аппараты отключаются от общей схемы для удаления отработанного сырья и загрузки новой порции твердой фазы, подлежащей экстрагированию. Эти аппараты просты по конструкции, но низко производительны. В них обеспечивает легкость отделения жидкой фазы от твердой, сохраняется первоначальный размер частиц, исключается их истирание.

Широкое распространение получили колонные аппараты. По виду расположенного в них транспортного устройства - на лопастные, шнековые и цепные. Одноколонный экстрактор (рисунок 10.5,в). Здесь перемещение твердого материала выполняется снизу вверх за счет шнека или лопастного транспортера. Если плотность

твердой фазы значительно превосходит плотность жидкость, то колонный аппарат может работать без транспортного устройства и подача материала осуществляется с помощью шнека.

По аналогичному принципу работают экстракторы с цепным лопастным транспортером (рисунок 17.6). Достоинством этих аппаратов является то, что материал располагается набольшими порциями на каждой перфорированной лопасти, благодаря чему при движении он не деформируется. В этих аппарата легко осуществлять заданный температурный режим. Недостатком является сложность в эксплуатации, занимает большой объем и площади.

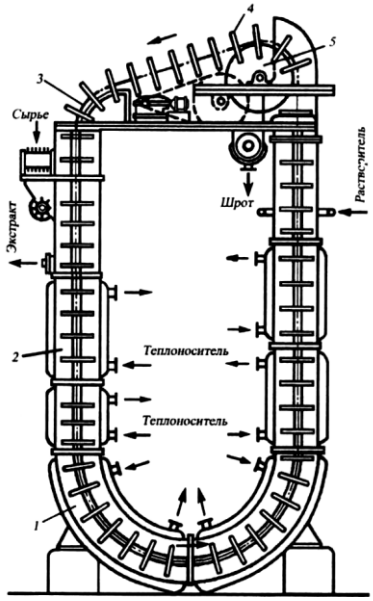


Рисунок 17.6 – Диффузионный аппарат непрерывного действия:

1 – круглый участок; 2 – вертикальная колонна; 3 – роликовая цепь; 4 – рамки; 5 – приводной барабан.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое экстракция?
2. Какими свойствами должны обладать экстрагенты?
3. Опишите процесс экстракции в системе «жидкость-жидкость».
4. Из каких стадий состоит процесс экстракции в системе твердое тело-жидкость».
5. Какая аппаратура применяется для проведения процесса экстракции?
6. Опишите схему процесса экстракции путем однократного контакта .
7. Опишите схему процесса экстракции путем многократного контакта .
8. Требования, предъявляемые к органическим растворителям для экстракции.

Список литературы

Основная

1. Машины и аппараты пищевых производств: в 3 кн. Кн. 1/ред. В.А. Панфилов. - М.: КолосС, 2009. - 610 с.- ISBN 978-5-9532-0509-2
2. Машины и аппараты пищевых производств: в 3 кн. Кн. 3/ред. В.А. Панфилов. - 2-е изд., доп. и перераб. - М.: КолосС, 2009. - 551 с. ISBN 978-5-9532-0754-6
3. Процессы и аппараты пищевых производств: учебник для вузов. В 2-х кн. Кн. 2 / А.Н. Остриков, Ю.В. Красовичкий, А.А. Шевцов; ред. А.Н. Остриков. - СПб.: ГИОРД, 2007. - 608 с. ISBN 978-5-98879-051-8

4. Процессы и аппараты пищевых производств: учебник / Ю.М. Плаксин, Н.Н. Малахов, В.А. Ларин. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: КолосС, 2007. - 760 с. ISBN 978-5-9532-0581-8

Дополнительная

1. Процессы и аппараты пищевой технологии: учебник/Г.Д. Кавецкий, Б.В. Васильев. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Колос, 2000. - 551 с.
2. Процессы и аппараты пищевых производств: учебник / В.И. Горбатюк. - М.: Колос, 1999. - 330 с.

Библиографический список

а) основная литература (библиотека СГАУ)

1. Алексеев, Г.В. Виртуальный лабораторный практикум по курсу «Процессы и аппараты пищевых производств» [Электронный ресурс] : учеб. пособие / Г.В. Алексеев, И.И. Бриденко, Н.И. Лукин. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2011. — 144 с. — Режим доступа: https://e.lanbook.com/book/4121

2. Вобликова, Т.В. Процессы и аппараты пищевых производств [Электронный ресурс] : учеб. пособие / Т.В. Вобликова, С.Н. Шлыков, А.В. Пермяков. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2017. — 204 с. — Режим доступа: https://e.lanbook.com/book/90162

3. Машины и аппараты пищевых производств: в 3 кн. Кн. 1/ред. В.А. Панфилов. - М.: КолосС, 2009. - 610 с.- ISBN 978-5-9532-0509-2

4. Машины и аппараты пищевых производств: в 3 кн. Кн. 3/ред. В.А. Панфилов. - 2-е изд., доп. и перераб. - М.: КолосС, 2009. - 551 с. ISBN 978-5-9532-0754-6

5. Процессы и аппараты пищевых производств: учебник для вузов. В 2-х кн. Кн. 1 / А.Н. Остриков, Ю.В. Красовичкий, А.А. Шевцов; ред. А.Н. Остриков. - СПб.: ГИОРД, 2007. - 704 с. ISBN 978-5-98879-041-9

6. Процессы и аппараты пищевых производств: учебник для вузов. В 2-х кн. Кн. 2 / А.Н. Остриков, Ю.В. Красовичкий, А.А. Шевцов; ред. А.Н. Остриков. - СПб.: ГИОРД, 2007. - 608 с. ISBN 978-5-98879-051-8

7. Виртуальный лабораторный практикум по курсу "Процессы и аппараты пищевых производств" : учеб. пособие для студ. вузов по спец. 240902 "Пищевая биотехнология"; рек. УМО / Г. В. Алексеев, И. И. Бриденко, Н. И. Лукин. - СПб. : Лань, 2011. - 143 с. : ил. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - ISBN 978-5-8114-1135-1

8. Процессы и аппараты пищевых производств: учебник / Ю.М. Плаксин, Н.Н. Малахов, В.А. Ларин. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: КолосС, 2007. - 760 с. ISBN 978-5-9532-0581-8

б) дополнительная литература

1. Процессы и аппараты пищевой технологии: учебник/Г.Д. Кавецкий, Б.В. Васильев. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Колос, 2000. - 551 с.

2. Процессы и аппараты пищевых производств: учебник / В.И. Горбатюк. - М.: Колос, 1999. - 330 с.

3. Процессы и аппараты пищевых производств: учебник/Ю.В. Космодемьянский. - Б. м.:б. и., 1997. – 208 с.

в) базы данных, информационно-справочные и поисковые системы, Агропоиск, полнотекстовая база данных иностранных журналов Doal, поисковые системы Rambler, Yandex, Google:

- Электронная библиотека СГАУ - http://library.sgau.ru

http://www.fcior.edu.ru/ Федеральный центр информационно-образовательных ресурсов.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение…… …. …….3
Лекция 1. НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ И АППАРАТОВ 3
1. Цель и задачи дисциплины.
2. Аппарат (машина). Требования, предъявляемые к ним.
3. Классификация машин и аппаратов пищевых производств.
4. Классификация основных процессов. Законы переноса массы и энергии.
5. Общие сведения о процессе измельчения.
6. Резание. Теория процесса резания. Классификация режущих устройств.

Лекция 2 МЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ. ПРОЦЕСС ДРОБЛЕНИЯ 11
1. Классификация способов дробления.
2. Устройство и работа основных типов дробилок. Их достоинства и недостатки.

Лекция 3
ПРОЦЕССЫ ПРЕССОВАНИЯ ПИЩЕВЫХ СРЕД 19
4. Общая характеристика процесса прессования пищевых продуктов.
5. Обезвоживание и брикетирование.
6. Формование пищевых продуктов.

Лекция 4 ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ.
ПРОЦЕСС ПЕРЕМЕШИВАНИЯ 32
1. Общая характеристика процесса перемешивания.
2. Характеристика и применимость механических мешалок.
3. Способы перемешивания.

Лекции 5,6 ПРОЦЕСС ФИЛЬТРОВАНИЯ 38
4. Общая характеристика процесса фильтрования.
5. Кинетика процесса фильтрования (дифференциальное и критериальное уравнения процесса).
6. Аппаратура для реализации процесса фильтрования. Классификация оборудования и принцип действия фильтров.

Лекция 7. ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ.
ПРОЦЕСС ОСАЖДЕНИЯ 51

1. Общая характеристика процесса осаждения.
2. Осаждение в поле действия сил тяжести.
3. Осаждение в центробежном поле.

Лекция 8
ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ. ПЕНООБРАЗОВАНИЕ И ПСЕВДООЖИЖЕНИЕ. 59
1. Пенообразование и взбивание.
2. Псевдоожижение.

Лекции 9, 10
ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ 61
5. Общая характеристика тепловых процессов. Движущая сила тепловых процессов.
6. Критерии теплового подобия. Интенсификация тепловых процессов.

7. Классификация аппаратов. Выбор конструкции аппаратов и типа теплоносителя.
8. Основы расчета ТА.

Лекция 11, 12
ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ. ВЫПАРИВАНИЕ **75**

2. Выпаривание

2.1 Общая характеристика процесса выпаривания. Однокорпусная выпарная установка.

1.2.Многократное выпаривание.

2.3 Выпаривание с применением теплового насоса.

2.4 Выбор выпарных аппаратов в зависимости от области их применения.

3. Специальные тепловые процессы:

2.3 Охлаждение, конденсация, нагревание, кипение.

2.4 Замораживание.

Лекция 13. МАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ **94**

1. Общая характеристика массообменных процессов.
2. Механизм массопередачи. Массоотдача, массопередача, массопроводность.
3. Аппараты для ведения процессов массопередачи.

Лекция 14, 15 ПРОЦЕСС СУШКИ **99**

1. Общая характеристика процесса сушки
2. Статика сушки. Расчет сушильного процесса
3. Теоретический сушильный процесс
4. Основные аппараты для сушки продуктов

Лекция 16
ПРОЦЕСС ПЕРЕГОНКИ И РЕКТИФИКАЦИИ **116**

1. Общие сведения.
2. Теоретические основы процессов.
3. Простая перегонка.
4. Ректификация
5. Схемы ректификационных установок

Лекция 17 ПРОЦЕСС ЭКСТРАКЦИИ **133**

1. Общая характеристика процесса экстракции.
2. Экстракция в системе жидкость-жидкость.
3. Экстрагирование в системе твердое тело – жидкость.
4. Аппаратурное оформление процесса экстракции.