

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕ-
ДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Методические указания по выполнению практических занятий по дисциплине

«Процессы и аппараты пищевых производств»

для студентов направления подготовки 43.03.01 - Сервис, направленность

(профиль) - Гастрономия и сервис.

Ставрополь, 2026

Оглавление

Тема 1. Основные положения и научные основы дисциплины.	4
Тема 2. Основы расчета процессов и аппаратов и основные свойства пищевого сырья и продуктов	12
Тема 3. Моделирование и подобие процессов и аппаратов	18
Тема 4. Измельчение, прессование, формование сырья и сортирование сыпучих материалов.	28
Тема 5. Перемешивание и разделение неоднородных систем	43
Тема 6. Псевдоожижение, осаждение и сепарирование в поле центробежных сил, мембранные методы разделения жидких систем	53
Тема 7. Тепловые процессы и теплообменные аппараты.	68
Тема 8. Процессы массопередачи	75
Тема 9. Процессы сушки сырья и продуктов	84
Литература	95

Введение

Целью дисциплины является формирование набора профессиональных компетенций будущего бакалавра в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 43.03.01 - Сервис, направленность (профиль) - Гастрономия и сервис.

Задачи дисциплины состоят в изучении на базе фундаментальных законов физики и химии общих процессов, протекающих в пищевых производствах, изучении современных аппаратов, общих методов их расчёта, путей рационализации процессов, выбора оптимальных конструкций аппаратов в конкретных производствах, в освещении основных технических проблем, научных достижений и современных тенденций использования новых физических методов обработки пищевых продуктов в тесной взаимосвязи с вопросами технологии и сервиса.

Тема 1. Основные положения и научные основы дисциплины

Цель занятия: изучить содержание и задачи курса, историю развития дисциплины, классификацию основных процессов и аппаратов, законы равновесия жидких и газовых систем, общие принципы анализа и расчета ПАПП, требования, предъявляемые к аппаратам.

Задачами занятия является освоение:

1. Классификации ПИАПП.
2. Законов равновесия жидких и газовых систем.
3. Общих принципов анализа и расчета ПАПП.
4. Требования, предъявляемые к аппаратам.

Формируемые компетенции

Код	Формулировка:
ОПК-3	способен использовать знания инженерных процессов при решении профессиональных задач и эксплуатации современного технологического оборудования и приборов
ПК-5	способностью проводить проектные расчеты, обосновывать и осуществлять технологические компоновки, подбор оборудования для производственных технологических линий, основных и вспомогательных помещений, в том числе с использованием информационных технологий

2. Теоретическая часть

(При этой части необходимо также использовать соответствующую тему из ЭКЛ)
Все многообразие процессов пищевой промышленности можно разделить на 8 основных классов:

1. Гидромеханические;
2. Тепловые;
3. Массообменные;
4. Механические.
5. Химические.
6. Биохимические (микробиологические, ферментативные и др.).
7. Электрофизические.
8. Мембранные.

За последние годы массообменные процессы пополнились новой и весьма важной группой мембранных процессов.

В настоящее время в стадии становления и развития находится новый большой и очень перспективный раздел технологии - биотехнология.

Количественное описание процессов пищевой технологии основано на:

- законах химической термодинамики и кинетики;
- в совокупности с законами переноса количества движения, теплоты, массы.

Современные процессы должны осуществляться непрерывно и с большими скоростями, с применением средств настройки на оптимальный режим, отвечать условиям комплексного использования сырья и энергии, исключая возможность загрязнения воздушного и водного бассейнов вредными выбросами.

2.1. Классификация основных процессов

Производственный процесс – совокупность приемов, выполняемых направленно для достижения определенного результата. Другими словами - это последовательные и закономерные изменения параметров системы «продукт - окружающая среда», приводящие к возникновению в ней новых свойств.

Технология – ряд производственных процессов (совокупность действий) выполняемых с целью получения продукта с заданными свойствами.

Задачи технологий – поиск наиболее оптимальных технологических процессов с целью создания заданного продукта.

Технологический аппарат - устройство или приспособление, предназначенное для проведения технологического процесса.

1. **Гидромеханические процессы**, скорость которых определяется законами гидродинамики - науки о движении жидкости и газа. К этим процессам относятся перемещение жидкостей и газов, разделение жидких и газовых неоднородных систем в поле силы тяжести (отстаивание), в поле центробежных сил (центрифугирование), а также под действием разности давлений при движении через пористый слой (фильтрация) и перемешивание жидкостей.
2. **Тепловые процессы**, протекающие со скоростью, определяемой законами теплопередачи - науки о способах распространения тепла. Такими процессами являются нагревание, охлаждение, выпаривание и конденсация паров.
3. **Массообменные (диффузионные) процессы**, характеризующиеся переносом одного или нескольких компонентов исходной смеси из одной фазы в другую через поверхность их раздела. К этой группе процессов, описываемых законами массопередачи, относятся абсорбция, перегонка (ректификация), экстракция из растворов, кристаллизация, адсорбция и сушка.
4. **Механические процессы**, описываемые законами механики твердых тел. Они применяются в основном для подготовки исходных твердых материалов и обработки конечных твердых продуктов, а также для транспортирования кусковых и сыпучих материалов. К механическим процессам относятся измельчение, транспортирование, сортировка (классификация), дозирование и смешение твердых веществ.

2.2 Классификация по организационно-техническому признаку.

- 1_ Процессы и аппараты непрерывного действия. Все стадии процесса происходят одновременно, но в различных точках пространства (проточные аппараты, составляющие единую установку – сушка или пастеризация молока).
- 2_ Процессы и аппараты периодического действия. Стадии процесса осуществляются в одном аппарате, но в определенной последовательности (варка пищи в пищеварочных котлах).
- 3_ Процессы и аппараты комбинированного действия. Одни стадии осуществляются периодически, а другие непрерывно на соответствующих машинах и аппаратах (приготовление хлеба: брожение - периодически; выпечка - непрерывно).

2.3 Классификация по изменению параметров процесса во времени.

Стационарные. Значения каждого параметра являются постоянными во времени и зависят лишь от положения данной точки системы в пространстве

Нестационарные. Параметры зависят от положения данной точки системы в пространстве и от времени

Подавляющее большинство периодических процессов относятся к неустановившимся.

Непрерывные процессы являются стационарными, т. к. в каждый момент времени в каждой конкретной точке системы параметры процесса остаются постоянными.

2.4 Классификация по кинетическим закономерностям

Кинетика – наука о механизмах и скоростях протекания процессов. Основной закон кинетики: скорость процесса пропорциональна движущей силе процесса и обратно пропорциональна сопротивлению:

$$(1/F) \cdot (dV/d\tau) = (\Delta/R) = k \Delta$$

где F – площадь поверхности, через которую осуществляется перенос энергии или массы, м²; V – количество массы вещества или энергии, кг; τ – продолжительность, с; Δ – движущая сила; R –

сопротивление; k – коэффициент скорости процесса, проводимость (величина, обратная сопротивлению).

Мембранные.

К основным мембранным методам разделения относятся (размер задерживаемых частиц) :

- 1_ микрофльтрация (0,1...10 мкм или $10^{-7} \div 10^{-5}$ м)
- 2_ ультрафльтрация (0,01...0,1 мкм или $10^{-8} \div 10^{-7}$ м)
- 3_ нанофльтрация (0,001...0,01 мкм)
- 4_ обратный осмос менее 0,001 мкм или $10^{-10} \div 10^{-8}$ м.)
- 5_ диализ,
- 6_ электродиализ,
- 6_ испарение через мембрану,
- 8_ разделение газов.

Осмоз — это физико-химический процесс, при котором растворитель (обычно вода) самопроизвольно переходит через полупроницаемую мембрану из менее концентрированного раствора в более концентрированный. Мембрана пропускает воду, но задерживает растворенные вещества.

Это явление лежит в основе питания растений, обмена веществ в клетках и работы систем обратного осмоса.

Основные аспекты осмоса:

- Природное явление: Происходит без затрат энергии, стремясь выровнять концентрации по обе стороны мембраны.
- Биологическая роль: Корни растений впитывают влагу из почвы, а клетки организма регулируют водно-солевой баланс именно за счет осмоса.
- Обратный осмос (фльтрация):
В отличие от прямого, обратный осмос требует давления (5-10 атм), которое заставляет воду двигаться в обратном направлении — из более концентрированного раствора в чистый, через специальную мембрану.
- Применение: Используется для опреснения морской воды, глубокой очистки питьевой воды в бытовых фльтрах, в медицине и на автомойках.
- Эффективность: Мембраны обратного осмоса задерживают до 98-99% всех примесей, включая соли жесткости, тяжелые металлы, бактерии и вирусы.
Пример в быту: Маринование овощей. Соленый раствор (высокая концентрация) вытягивает воду из клеток огурцов (низкая концентрация), делая их более плотными.

Микрофльтрация - отделение от растворителя частиц раз- мером $10^{-7} \div 10^{-5}$ м.

Ультрафльтрация - выделение на проницаемых мембранах высокомолекулярных фракций жид- костных систем $10^{-8} \div 10^{-7}$ м.

Размер пор таких мембран - не более 0,5 мкм, а чаще $10^{-7} \div 10^{-10}$ м.

Мембранные процессы классифицируются по виду основной движущей силы процесса, которой является градиент химического (для незаряженных частиц потока) или электрохимического (для заряженных частиц потока) потенциала. Однако для технических расчётов в качестве движущей силы процесса принимают градиент фактора, определяющего скорость данного процесса.

Таким образом, основной движущей силой мембранного процесса может быть:

- градиент давлений у баромембранных процессов (обратный осмос, нано-, ультра- и микрофльтрация);
- градиент концентраций – диффузионно-мембранные процессы (диализ, испарение через мембрану, мембранное разделение газов и др.);
- градиент электрического потенциала – электромембранные процессы (электродиализ, электроосмос и др.);
- градиент температур – термомембранные процессы (мембранная дистилляция и др.).

Прошедший через мембрану продукт принято называть пермеатом, а оставшуюся перед мембраной разделяемую смесь – ретантом (концентратом).

В данном ЭКЛ рассматриваются в основном баромембранные процессы.

Периодические процессы проводятся в аппаратах, в которые через определенные промежутки времени загружаются исходные материалы; и после их соответствующей переработки (например, проведения химической реакции) происходит выгрузка конечного продукта. По окончании разгрузки аппарата и его повторной загрузки процесс повторяется снова.

Таким образом, периодический процесс характеризуется тем, что все его стадии протекают в одном месте (в одном аппарате), но в разное время.

Непрерывные процессы осуществляются в проточных аппаратах. Поступление исходных материалов в аппарат и выгрузка конечных продуктов производится одновременно и непрерывно.

Следовательно, непрерывный процесс характеризуется тем, что все его стадии протекают одновременно, но разобщены в пространстве, т.е. осуществляются в разных аппаратах или в различных частях одного аппарата.

Известны также комбинированные процессы. К ним относятся непрерывные процессы, отдельные стадии которых проводятся периодически, либо периодические процессы, одна или несколько стадий которых протекает непрерывно.

Основные преимущества непрерывных процессов по сравнению с периодическими следующие:

1. Нет перерывов в выпуске конечных продуктов, т.е. отсутствуют затраты времени на загрузку аппарата исходными материалами и выгрузку из него готовой продукции;
2. Более легкое автоматическое регулирование и возможность более полной механизации;
3. Большая компактность оборудования, что сокращает капитальные и эксплуатационные расходы;
4. Более полное использование подводимого (отводимого) тепла за счет отсутствия перерывов в работе аппаратов.

Благодаря указанным достоинствам использование непрерывных процессов увеличивает производительность аппаратуры, уменьшает количество обслуживающего персонала, улучшает условия труда и повышает качество конечной продукции.

Периодические процессы сохраняют свое значение главным образом в производствах относительно небольшого масштаба с разнообразным ассортиментом продукции, где их применение позволяет достичь большей гибкости оборудования при меньших капитальных затратах.

Непрерывные процессы отличаются от периодических и по распределению времени пребывания частиц среды в аппарате. В периодически действующем аппарате все частицы среды находят одинаковое время, а в непрерывнодействующем их времена пребывания могут значительно различаться.

2.5 Законы равновесия жидких и газовых систем

Существенным вопросом, который определяет состояние системы, является степень её удаления от состояния равновесия.

Системы, находящиеся в состоянии равновесия, не меняют состояния во времени. Таков, например, однородные системы (газ, жидкость), у которых давление и температура одинаковы во всех частях.

В инженерном деле одним из важнейших является вопрос о направлении изменения в состоянии системы при внешнем воздействии.

Исследование этого вопроса опирается на два положения термодинамики:

- 1_ принцип Ле-Шателье и
- 2_ правило фаз Гиббса.

Согласно принципа Ле-Шателье в системе, введенной из равновесия, происходят изменения, направление сил которых противоположно направлению сил, выводящих систему из равновесия.

Проясним принцип Ле-Шателье на примере.

В цилиндрическом сосуде с водой и поршнем над ней равновесное давление паров над поверхностью воды самопроизвольно устанавливается соответствующем температуре сосуда. Если внешним усилием переместить поршень в новое положение, давление паров над поверхностью воды увеличится. Это вызовет самопроизвольную их конденсацию. В результате через некоторое время давление паров примет первоначальное значение, т. е. система вновь окажется в равновесии, хотя положение поршня стало новым. Явление конденсации паров в процессе самопроизвольного восстановления равновесия, нарушенного нами преднамеренно, может использоваться как искусственный организованный процесс конденсации.

Правило фаз Гиббса можно сформулировать следующим образом:

В многокомпонентной многофазной системе часть параметров может изменяться независимо друг от друга, т. е. им можно задавать произвольные значения; оставшаяся их часть является зависимой; их изменения автоматически подстраиваются к изменениям независимых параметров.

То есть правило фаз Гиббса устанавливает зависимость между числом компонентов системы, числом фаз и числом степеней свободы (число независимых параметров) :

Фазой называется определённое количество вещества, физически однородное по массе.

Компонент – чистые химические соединения, из которых состоят фазы и которые могут переходить из одной фазы в другую.

Число степеней свободы – число независимых параметров, которое может быть выбрано произвольно и определяет значение остальных параметров.

Рассмотрим применение правила фаз Гиббса на следующем примере.

В закрытом сосуде с раствором этилового спирта в воде числа фаз (пар и жидкость); число компонентов (вода и спирт); число степеней свободы :

Параметрами, определяющими состояние этой системы, являются: температура и концентрация спирта. Произвольные значения могут быть заданы только из двух параметров, например, для концентрации спирта и температуры.

Давление же (сосуд должен быть закрыт, чтобы система была замкнутой) устанавливается самопроизвольно и определяется заданными параметрами.

Если в рассмотренном примере сосуд оставить открытым (независимо поддерживать в нём заданное давление, равное атмосферному), то в смеси жидкостей начнутся процессы, направленные на восстановление равновесного значения давления (процессы либо испарения, либо конденсации паров).

При этом концентрация спирта, как в парах, так и в жидкости будет изменяться в соответствии с первым законом Д. П. Коновалова. Это явление лежит в основе процесса перегонки.

2.6. Общие принципы анализа и расчета ПАП

Содержание и последовательность расчетов будут следующими.

- 1_ Исходным этапом является расчет и анализ статики процесса, т.е. рассмотрение данных о равновесии, на основе которых определяют направление протекания и возможные пределы осуществления процесса (принцип Ле-Шателье).
- 2_ Пользуясь этими данными, находят предельные значения параметров процесса, необходимые для вычисления его движущей силы.
- 3_ Затем составляются материальные и энергетические балансы, исходя из законов сохранения массы и энергии.
- 4_ Последующий этап представляет собой расчет кинетики процесса (там, где возможно), определение скорости его протекания.
- 5_ Зная скорость и величину движущей силы (при выбранном оптимальном режиме работы аппарата)
- 6_ Находят его рабочую поверхность (объем),
- 7_ Затем определяют основные размеры аппарата.

Материальный баланс.

По закону сохранения массы количество поступающих веществ $\sum G_n$ должно быть равно количеству веществ $\sum G_k$ получаемых в результате проведения процесса, с учетом потерь $\sum G_p$:

$$\sum G_H = \sum G_K + \sum G_P \quad (1-1)$$

Материальный баланс составляют для процесса в целом или для отдельных его стадий. Баланс может быть составлен для всех веществ, участвующих в процессе, и лишь для одного из компонентов, если обрабатываемая смесь является двух- или многокомпонентной. Баланс составляют за единицу времени (например, за 1 час или 1 сутки) в расчете на единицу количества исходных или конечных продуктов.

На основе материального баланса определяют выход продукта на единицу затраченного сырья, под которым понимают выраженное в % отношение полученного количества продукта к максимальному, т.е. теоретически возможному.

Энергетический баланс. Его составляют на основе закона сохранения

энергии, согласно которому количество энергии, введенной в процесс, равно количеству выделившейся энергии, т.е. приход энергии равен ее расходу.

Проведение любого процесса обычно связано с затратой различных видов энергии - механической, электрической и т.д. Эти процессы часто сопровождаются изменением энтальпии системы, например, вследствие изменения агрегатного состояния веществ. При проведении химических реакций очень большое значение может иметь их тепловой эффект.

Частью энергетического баланса является тепловой, который в общем виде выражается уравнением:

$$\sum Q_H = \sum Q_K + \sum Q_P \quad (1-2)$$

При этом количество вводимого тепла:

$$\sum Q_H = Q_1 + Q_2 + Q_3,$$

где Q_1 – количество тепла, вводимое с исходными веществами;

Q_2 – количество тепла, подводимого извне, например, с теплоносителем, обогревающим аппарат;

Q_3 – тепловой эффект физических и химических превращений.

Количество отводимого тепла $\sum Q_K$ складывается из тепла, удаляемого с конечными продуктами и отводимого с теплоносителем, а также тепловых потерь $\sum Q_P$.

В энергетическом балансе, кроме тепла, учитывается приход и расход всех видов энергии, например, затраты механической энергии на перемешивание жидкостей или сжатие и транспортирование газов.

На основании теплового баланса находят расход водяного пара, воды и других теплоносителей, а по данным энергетического баланса - общий расход энергии на осуществление процесса.

Общие принципы расчета машин и аппаратов пищевых производств

Расчет процессов и расчет машин и аппаратов осуществляют в следующей очередности:

- расчет материального и теплового баланса;
- определение направления течения процесса и условий равновесия;
- определение движущей силы;
- определение скорости процесса;
- определение основного размера аппарата (рабочий объем или рабочая площадь поверхности) по данным о скорости процесса и величине движущей силы при оптимальном режиме;
- определение остальных размеров (площадь, объем) аппарата по одному из основных размеров.

Расчет материального баланса основывается на законе сохранения вещества:

$$G_H = G_B + G_P \quad (1.4)$$

где G_H - масса поступивших веществ; G_B – масса получившихся веществ; G_P – масса потерь.

Расчет энергетического баланса основывается на законе сохранении энергии

$$Q_H = Q_K + Q_P \quad (1.6)$$

где Q_H - подводимое количество теплоты; Q_K - полезно затраченное количество теплоты; Q_P - потери теплоты.

Основы расчёта процессов и аппаратов

При расчётах процессов и аппаратов перед инженером обычно стоят следующие основные задачи:

- 1) при заданных расходах исходных материалов определить количество получаемых продуктов и энергию, необходимую для проведения процесса;
- 2) определить условия равновесного (предельного) состояния системы;
- 3) определить оптимальные режимы работы аппаратов;
- 4) рассчитать основные размеры аппаратов, работающих в оптимальных условиях.

Сложность расчета тепломассообменной поверхности (объёма) аппарата или продолжительности процесса заключается в основном в определении кинетических коэффициентов и средней движущей силы процесса.

При переходе от лабораторных аппаратов к промышленным изменяется гидродинамическая обстановка в аппарате, что вызывает изменение величины движущей силы процесса и кинетических коэффициентов. Поэтому необходимо при расчёте промышленного оборудования в расчётные уравнения вводить соответствующие коэффициенты, учитывающие изменение масштаба процесса и аппарата. Такие коэффициенты получают на основании физического и математического моделирования процессов и аппаратов.

2.7 Требования, предъявляемые к аппаратам, применяемым в производстве продовольственных продуктов

Технологические требования. Аппараты должны обеспечивать качественное производство пищевых продуктов при минимальных затратах времени, потерях сырья и его питательных свойств.

Эксплуатационные требования. Аппараты должны быть просты в обслуживании, обеспечивая минимальные затраты труда, коррозионную стойкость, доступность для осмотра, чистки, ремонта.

Энергетические требования. Аппараты должны обеспечивать минимальный расход энергии на единицу готовой продукции.

Конструктивные требования. Аппараты должны иметь стандартные, легко заменяемые детали; унифицированные узлы, выполненные из недорогих металлов и материалов, не оказывающих вредных воздействий на продукт (пищевая нержавеющая сталь). Аппараты должны быть максимально универсальными, просты в сборке и разборке, иметь грамотный дизайн, низкую металлоёмкость и материалоемкость.

Экономические требования. Затраты на изготовление, монтаж и эксплуатацию аппаратов должны быть низкими и окупаться в кратчайшие сроки.

Требования безопасности. Эксплуатация и обслуживание аппаратов должны быть неукоснительно безопасными.

Требования защиты окружающей среды. Отходы (жидкие, твердые и газообразные), получаемые в процессе производства и выбрасываемые в среду, не должны оказывать на нее загрязняющего воздействия.

Вопросы для обсуждения материала темы:

1. Что подразумевается под основными и специфическими процессами?
2. На какие основные группы подразделяются основные процессы? Какими законами определяется скорость их протекания?
3. Какими показателями характеризуются периодический и непрерывный процессы? Их преимущества и недостатки?

4. Какие существуют аппараты по распределению концентраций (температур) в рабочем объёме? В чём особенности каждого из них?
5. Перечислите законы, являющиеся теоретическим фундаментом науки о процессах и аппаратах.
6. Как составляются, и для чего необходимы материальный и тепловой балансы?
4. Объясните сущность принципа Ле-Шателье и правила фаз Гиббса.
8. Какому общему закону подчиняются процесс пищевой технологии? Как записывается этот закон?

Тема 2. Основы расчета процессов и аппаратов и основные свойства пищевого сырья и продуктов

Цель занятия: изучение методики расчета аппаратов и основных свойств и показателей пищевых продуктов и сырья.

Задачами занятия является освоение:

1. Основ расчета аппаратов периодического и непрерывного действия.
2. Свойств сырья и продуктов.
3. Выполнение расчетов отдельных показателей по заданию преподавателя.

Формируемые компетенции

Код	Формулировка:
ОПК-3	способен использовать знания инженерных процессов при решении профессиональных задач и эксплуатации современного технологического оборудования и приборов
ПК-5	способностью проводить проектные расчеты, обосновывать и осуществлять технологические компоновки, подбор оборудования для производственных технологических линий, основных и вспомогательных помещений, в том числе с использованием информационных технологий

Теоретическая часть

(При этой части необходимо также использовать соответствующую тему из ЭКЛ)

При расчёте аппаратов (машин) периодического действия задаются производительностью в единицу времени (в час, сутки и т. д.) и периодом процесса $\Delta\tau$.

Число партий продукта в сутки, которое производится одним аппаратом или машиной, $b = 24/\Delta\tau$.

Число партий, которое должно быть выпущено в сутки для достижения заданной производительности V_τ , $a = V_\tau/V_p$, где V_p – рабочий объём аппарата.

Требуемое число аппаратов или машин $n = a/b = V_\tau \Delta\tau / (24V_p)$.

Если заданная производительность обеспечивается работой одного аппарата или машины ($n = 1$), то его рабочий объём $V_p = V_\tau \Delta\tau / 24$.

Для непрерывного аппарата идеального вытеснения, в котором протекает массообменный процесс, приводящий к изменению концентрации исходного продукта от x_H до x_K , основное уравнение можно записать так:

$$\frac{M}{V_p \tau} = K_{\perp} \Delta x_{cp},$$

где M – массовое количество получаемого продукта; V_p – рабочий объём аппарата; τ – продолжительность процесса; $K_{\perp}$ – объёмный коэффициент скорости процесса; Δx_{cp} – средняя движущая сила процесса.

Если объём сырья, перерабатываемого в единицу времени, составляет V_{τ} , то средняя производительность аппарата в единицу времени (в кг/с , кг/ч)

$$M_{\tau} = M/\tau = V_{\tau}(x_k - x_n), \quad 2.3$$

а рабочий объём аппарата

$$V_p = \frac{V_{\tau}(x_k - x_n)}{K_{\perp}\Delta x_{cp}}. \quad 2.4$$

Между производительностью аппарата и его рабочим объёмом существует определённая связь.

Из уравнения расхода $V_{\tau} = f\upsilon$, где f – площадь поперечного сечения аппарата; υ – линейная скорость. Умножим и разделим правую часть этого уравнения на длину аппарата L , тогда $V_{\tau} = f\upsilon L/L = V_p/\tau$, или

$$V_p = V_{\tau}\tau. \quad 2.5$$

Продолжительность процесса τ определим из сопоставления уравнений (2.1) и (2.5):

$$\tau = \frac{(x_k - x_n)}{K_{\perp}\Delta x_{cp}}. \quad 2.6$$

Если V_p оказывается значительным, то устанавливают несколько параллельно работающих аппаратов с рабочими объёмами $V_n = V_p/n$.

Сложность расчета тепломассообменной поверхности (объёма) аппарата или продолжительности процесса заключается в основном в:

- 1) определении кинетических коэффициентов и
- 2) средней движущей силы процесса.

При переходе от лабораторных аппаратов к промышленным изменяется гидродинамическая обстановка в аппарате, что вызывает изменение величины движущей силы процесса и кинетических коэффициентов. Поэтому необходимо при расчёте промышленного оборудования в расчётные уравнения вводить соответствующие коэффициенты, учитывающие изменение масштаба процесса и аппарата. Такие коэффициенты получают на основании физического и математического моделирования процессов и аппаратов.

Основные свойства пищевых продуктов и сырья

Многие пищевые продукты представляют собой однородные и неоднородные смеси. К однородным смесям относятся растворы, например, сахарные, водно-спиртовые, соки и т. д. Однородные смеси характеризуются концентрацией растворённого вещества.

К неоднородным смесям относятся смеси твёрдого вещества с жидкостью, смеси различных нерастворимых одна в другой жидкостей. Для характеристики неоднородных смесей вводят понятие объёмной или массовой доли, например, доля твёрдого вещества в жидкости.

Все свойства веществ можно разделить на физические (плотность, удельный вес, вязкость, поверхностное натяжение и др.) и теплофизические (удельная теплоёмкость, теплопроводность, температуропроводность и др.). Данные об этих свойствах для различных веществ и растворов в зависимости от температуры и давления приводятся в справочниках.

Знание зависимостей параметров от различных факторов, их взаимосвязей и закономерностей изменения в процессе обработки сырья имеет решающее значение для управления технологи-

ческим процессом и получения продукта с заданными свойствами. Для конкретного процесса существенными оказываются не все, а лишь определенные физические свойства сырья и продукта, называемые обычно техническими и учитываемые в инженерных расчетах процессов, машин и аппаратов.

Рассмотрим основные свойства веществ.

Плотностью ρ называют количество массы m вещества, содержащееся в единице его объема V :

$$\rho = \frac{m}{V}, \text{ кг/м}^3$$

Удельным (объемным) весом вещества γ называют вес G единицы её объема:

$$\gamma = \frac{G}{V}, \text{ Н/м}^3$$

Из выражений (2.7) и (2.8) можно получить связь между плотностью и удельным весом. Поскольку $G = mg$, то получим $\gamma = \rho g$.

Удельный объем v — это объем вещества V , занимаемый единицей массы m :

$$v = \frac{V}{m}, \text{ м}^3/\text{кг}$$

Удельный объем есть величина, обратная плотности $v = 1/\rho$.

Отношение плотностей двух веществ называется относительной плотностью.

Для характеристики сыпучих продуктов (зерна, сахарного песка, круп и др.) вводится понятие насыпной плотности, которая описывается формулой:

$$\rho_n = (1 - \varepsilon) \rho_{тв},$$

где ε — порозность (пористость) сыпучего материала, определяемая по формуле $\varepsilon = V_n/V_n$; V_n — объем пустот свободно насыпанного материала, м^3 ; V_n — объем свободно насыпанного материала, м^3 ; $\rho_{тв}$ — действительная плотность частиц материала, кг/м^3 .

Плотность суспензий находится по формуле

$$\rho_c = \rho_{тв} \varphi + (1 - \varphi) \rho_{ж},$$

где $\rho_{тв}$ — плотность твердых частиц в суспензии, кг/м^3 ; φ — доля твердой фазы в суспензии; $\rho_{ж}$ — плотность жидкости, кг/м^3 .

Плотность газов находится по формуле Клапейрона

$$\rho = \rho_0 \frac{T_0 p}{T p_0} = \frac{M}{22,4} \frac{p}{T p_0},$$

где ρ_0 — плотность газа при нормальных условиях ($T_0 = 273 \text{ К}$; $p_0 = 1013 \text{ кПа}$), кг/м^3 ; M — молекулярная масса газа, кг/кмоль ; T — абсолютная температура, К .

В неоднородных системах, одной из сред которых является жидкость, имеется поверхность фазового раздела, площадь которой стремится к минимуму под действием поверхностных сил. Эти силы возникают вследствие нескомпенсированного притяжения внутренними молекулами поверхностных слоёв. В результате на поверхности жидкости возникает давление, направленное внутрь жидкости по нормали к её поверхности. При создании новой поверхности требуется затрата энергии для преодоления сил давления, которая характеризуется коэффициентом поверхностного натяжения σ , измеряем в джоулях на квадратный метр ($\text{Дж/м}^2 = \text{Н} \cdot \text{м/м}^2 = \text{Н/м}$).

Поверхностное натяжение рассматривается как работа образования единицы площади поверхности раздела фаз или тел при постоянной температуре. Поверхностное натяжение жидкости определяют также как силу, действующую на единицу длины контура поверхности раздела и

стремящуюся сократить эту поверхность до минимума. Поэтому величина σ существенная для расчёта процессов образования капель при конденсации паров, паровых пузырей при кипении жидкостей и во многих других случаях. Поверхностное натяжение зависит от температуры и уменьшается с повышением её, снижаясь до нуля в критической точке.

По второму закону термодинамики система стремится уменьшить свободную энергию, что соответствует более устойчивому состоянию. Уменьшение поверхностной энергии в чистых жидкостях достигается уменьшением поверхности (сферическая форма капель или соединение мелких капель в большую), в **растворах – присутствием так называемых поверхностно-активных веществ, понижающих поверхностное натяжение растворителей**. К таким веществам относятся органические кислоты, альдегид, кетоны и др. Образование пены при технологической обработке продуктов также связано с понижением поверхностного натяжения и облегчением образования новых межфазных поверхностей.

Поверхностное натяжение жидкости рассчитывается по формуле

$$\sigma = \left(P_h \frac{\rho_{ж}}{M} \right)^4,$$

где P_h – парахор – постоянная, зависящая от поверхностного натяжения жидкости (её значение находят суммированием составляющих для атомов, групп и связей); M – молекулярная масса.

Капиллярностью называется свойство жидкости подниматься или опускаться в трубках или каналах малого диаметра на некоторую высоту под действием сил поверхностного натяжения. Это свойство имеет значение в различных процессах приготовления пищи, особенно в процессах массообменных, при которых жидкость или газ (пар) движутся по капиллярам или порам продукта.

Вязкость – свойство реальных жидкостей или жидкообразных веществ оказывать сопротивление усилиям, вызывающим относительное перемещение её частиц или при ламинарном течении. Это свойство обнаруживается при движении жидкости. Жидкость движется (течёт) вдоль неподвижной плоской стенки. Вследствие тормозящего влияния стенки слои жидкости будут двигаться с разными скоростями, значения которых возрастают по мере отдаления от стенки. Рассмотрим слои со скоростями v и $v + dv$, отстоящих друг от друга на расстоянии dn (рисунок 2.1). Приращение скорости на единицу длины по нормали к направлению оси потока называют градиентом

скорости $\frac{dv}{dn}$. Экспериментально показано, что касательная сила F , которую нужно приложить к верхнему слою для его равномерного сдвига относительно нижнего слоя, тем больше, чем больше градиент скорости. Сила F пропорциональна площади соприкосновения слоёв S , т. е.:

$$F = \mu S \frac{dv}{dn},$$

где μ – коэффициент пропорциональности, зависящий от рода жидкости и её температуры и называется динамический коэффициент вязкости (или динамической вязкостью), $\text{Па} \cdot \text{с}$; $\frac{dv}{dn}$ – градиент скорости, характеризует изменение скорости, приходящееся на единицу расстояния по нормали между слоями.

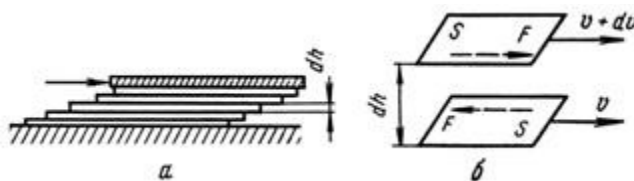


Рисунок 2.1 – К определению вязкости жидкости:
а – перемещение слоёв жидкости; б – два соседних слоя

Отношение $\frac{F}{S} = \tau$ есть касательные напряжения (напряжения внутреннего трения, напряжения сдвига). Тогда $\tau = \mu \frac{dV}{dn}$. Величину τ можно считать всегда положительной, поэтому в зависимости от знака $\frac{dV}{dn}$ имеем:

$$\tau = \pm \mu \frac{dV}{dn}.$$

Знак зависит от закона, изменения скорости по нормали к потоку и выбора направления нормали. Знак минус указывает на то, что касательное напряжение тормозит слой, движущийся с относительно большей скоростью, или разгоняет относительно медленно движущийся слой. Уравнение (2.12) выражает закон внутреннего трения Ньютона: напряжение внутреннего трения, возникающие между слоями жидкости при её течении, прямо пропорционален градиенту скорости.

Динамическая вязкость, устанавливаемая опытным путём при ламинарном течении жидкости с помощью вискозиметра, является физическим параметром жидкости и зависит от **свойств растворителя, её температуры, химического состава, концентрации и свойств растворённого вещества**. Для большинства жидкостей в справочниках приводятся таблицы динамической вязкости в зависимости от температуры.

Внутреннее трение характеризуется также кинематической вязкостью – это вязкость среды плотностью 1 кг/м^3 , динамическая вязкость которой равна $1 \text{ Па} \cdot \text{с}$:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

Вязкость жидкой смеси вычисляют по следующим формулам:

при $\mu_D > \mu_C$ и $\phi \geq 0,3$

$$\mu_{см} = \frac{\mu_C}{(1-\phi)} \left[1 + \frac{6\phi\mu_D}{(\mu_C + \mu_D)} \right];$$

при $\mu_D < \mu_C$ и $\phi \geq 0,3$

$$\mu_{см} = \frac{\mu_C}{(1-\phi)} \left[1 - \frac{1,5\phi\mu_D}{(\mu_C + \mu_D)} \right],$$

где μ_C и μ_D – вязкость, соответственно, сплошной и дисперсной фаз.

Вязкость газовых смесей определяется по формуле

$$\frac{M_{см}}{\mu_{см}} = \frac{m_1 M_1}{\mu_1} + \frac{m_2 M_2}{\mu_2} + \dots,$$

где $M_{см}$, M_1 , M_2 , ... – молекулярные масс смеси и отдельных компонентов газовой смеси; $\mu_{см}$, μ_1 , μ_2 , ... – вязкость смеси и отдельных компонентов смеси; m_1 , m_2 , ... – объёмные доли компонентов в газовой смеси.

Для пересчёта вязкости газа на температуры, отличные от $T = 273 \text{ K}$, пользуются формулой

$$\mu_t = \mu_0 \frac{(271+c)}{(T+c)} \left(\frac{T}{273} \right)^{1,5},$$

где μ_0 – вязкость при 273 K ; c – коэффициент Сатерленда (для азота $c = 114$, для кислорода $c = 131$, для воздуха $c = 124$); T – температура газа, K .

Существуют жидкости, для которых зависимость (2.12) неприменима, такие жидкости называются неньютоновскими и аномальными. Для ньютоновских жидкостей кривые течения (реограммы), т. е. кривые, изображающие зависимость между градиентом скорости течения жидко-

сти $\frac{dv}{dn}$ и возникающим в ней касательным напряжениям τ , носят линейный характер (рисунок 2.2). Для неньютоновских жидкостей кривые течения весьма многообразны и в общем случае не являются линейными. Расположение этих кривых на графике и их форма определяют класс неньютоновских жидкостей и характеризуют особенности их течения. Кривая 1 на рисунке 2.2 – дилатантные жидкости, кривая 2 – обычная ньютоновская жидкость, кривая 3 – псевдопластичные жидкости, кривая 4 – вязкопластичные жидкости.

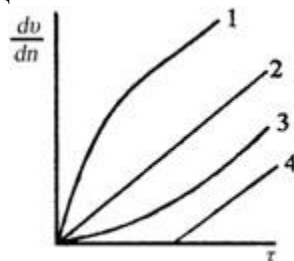


Рисунок 2.2 – Зависимость между градиентом скорости и касательными напряжениями для различных жидкостей

Нелинейность кривых течения неньютоновских жидкостей означает, что вязкость таких систем не имеет определённого значения, а с увеличением градиента скорости убывает или возрастает по некоторому закону. Таким образом, вязкость неньютоновских жидкостей является кажущейся и приближается к вязкости ньютоновских жидкостей при переходе к турбулентному течению. Для неньютоновских жидкостей характерны различные отклонения от течения ньютоновских жидкостей.

Их сопротивление ламинарному течению характеризуется эффективной вязкостью $\mu_{эф}$, под которой понимают вязкость ньютоновской жидкости при том же градиенте скорости.

Для характеристики свойств жидкостей используются также следующие свойства.

Сжимаемость – это свойство жидкости изменять свой объём при изменении давления. Характеризуется коэффициентом объёмного сжатия β_v :

$$\beta_v = -\frac{1}{V} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta p}, \text{ м}^2 / \text{Н}$$

где V – начальный объём, м^3 ; ΔV – изменение объёма, м^3 ; Δp – изменение давления, Па .

Величина обратная β_v , называется модулем объёмной упругости $K = 1/\beta_v$.

Капельные жидкости характеризуются очень малой сжимаемостью, поэтому в гидравлике сжимаемостью обычно пренебрегают, за исключением отдельных случаев.

Температурное расширение – изменение объёма жидкости в зависимости от температуры.

Характеризуется температурным коэффициентом объёмного расширения β_t :

$$\beta_t = -\frac{1}{V} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta T}, \text{ } ^\circ\text{К}^{-1} (\text{ } ^\circ\text{С}^{-1})$$

где ΔT – изменения температуры.

Теплоёмкость – это отношение количества теплоты, подводимой к веществу, к соответствующему изменению его температуры. Теплоёмкость единицы количества вещества называется удельной теплоёмкостью. В расчётах используют массовую, объёмную и мольную удельные теплоёмкости которыми называется количество теплоты, которое надо сообщить единице массы (объёма, молю) вещества для повышения его температуры на один градус.

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

Наиболее часто в расчётной практике используются изобарная теплоёмкость c_p и изохорная теплоёмкость c_v , которые связаны между собой уравнением $c_p - c_v = R$, где R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль · К), Дж/(кг · град).

Отношение $c_p/c_v = K$ называется показателем адиабаты.

Теплоёмкость жидкостей и газов зависит от температуры и увеличивается с её повышением. Удельная теплоёмкость пищевых продуктов зависит от рода вещества, температуры, содержания влаги (сухих веществ). Экспериментальные значения величин удельных теплоёмкостей пищевых продуктов приводятся в справочниках в виде таблиц и эмпирических формул.

Теплопроводность – это молекулярный перенос энергии от более нагретых участков тела к менее нагретым в результате теплового движения и взаимодействия микрочастиц, приводящий к выравниванию температуры тела. Основным законом передачи тепла теплопроводностью является первый закон Фурье, согласно которому плотность теплового потока прямо пропорциональна градиенту температуры:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dn},$$

где q – плотность теплового потока по нормали к изотермической поверхности, проведённой в направлении уменьшения температуры, Вт/м²; $\frac{dT}{dn}$ – градиент температуры, характеризующий изменение температуры, приходящееся на единицу расстояния между изотермическими поверхностями по нормали уменьшения температуры, К/м; λ – коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом теплопроводности, Вт/(м · К).

Интенсивность теплопроводности в твёрдых материалах, жидкостях и газах характеризуется **коэффициентом теплопроводности** λ , который является теплофизическим параметром вещества и показывает, какое количество теплоты проходит через 1 м² поверхности в течение 1 ч при градиенте изменения температур к изотермической поверхности, равном 1.

Теплопроводность пищевых продуктов в значительной степени зависит от их состава и присутствия примесей. Коэффициенты теплопроводности обычно представляют эмпирическими формулами.

Температуропроводностью называется процесс изменения температур в окрестности данной точки в объёме вещества при изменении температурного поля (распределения температур) в этом объёме. Она характеризуется коэффициентом температуропроводности:

$$\alpha = \frac{\lambda}{c\rho},$$

где α – коэффициент температуропроводности, м²/с; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К); c – удельная теплоёмкость, Дж/(кг · К); ρ – плотность, кг/м³.

Тогда дифференциальное уравнение теплопроводности в неподвижной среде, или **первый закон Фурье** примет вид

$$q = -\alpha c \rho \frac{dT}{dn}.$$

Коэффициент температуропроводности характеризует теплоинерционные свойства твёрдых, жидких и газообразных тел; при прочих равных условиях быстрее нагреется или охладится то тело, которое обладает большим коэффициентом температуропроводности.

1. Какие задачи решаются при проведении расчётов процессов и аппаратов?
2. Как рассчитываются объёмы аппаратов периодического и непрерывного действия?
3. Перечислите цели переработки пищевого сырья.
4. Что представляют собой уравнения состояния различных веществ?

5. Что такое вязкость? В каких единицах измеряется вязкость?
6. Какая существует связь между различными единицами измерения вязкости?
4. Какими основными теплофизическими свойствами характеризуются пищевые продукты и сырьё?
8. Объясните сущность поверхностного натяжения.
9. Что такое теплоёмкость? Чем она характеризуется и в каких единицах измеряется?
10. Что характеризует коэффициент теплопроводности, и в каких единицах он измеряется?
11. Показателем чего является коэффициент температуропроводности? Какова его связь с другими теплофизическими свойствами?

Тема 3. Моделирование и подобие процессов и аппаратов

Цель занятия: изучение теории и примеров применения теории подобия.

Задачами занятия является освоение:

1. Теории подобия.
2. Критериев гидродинамического и теплового подобия
3. Метода анализа размерностей.
3. Выполнение расчетов отдельных показателей по заданию преподавателя.

Формируемые компетенции

Код	Формулировка:
ОПК-3	способен использовать знания инженерных процессов при решении профессиональных задач и эксплуатации современного технологического оборудования и приборов
ПК-5	способностью проводить проектные расчеты, обосновывать и осуществлять технологические компоновки, подбор оборудования для производственных технологических линий, основных и вспомогательных помещений, в том числе с использованием информационных технологий

Теоретическая часть

(При этой части необходимо также использовать соответствующую тему из ЭКЛ)

Основы теории подобия. Условия однозначности

Теория подобия даёт ответ на вопрос, как следует поставить эксперимент и обработать полученные результаты и на какие процессы их можно распространить. Она позволяет установить условия эксперимента, при которых число опытов будет минимальным; определить наименьшее количество измеряемых величин и правильно обработать результаты экспериментов; установить области применимости полученных результатов.

Процессы пищевой технологии сложны и многообразны. В ряде случаев для их математического описания удаётся составить дифференциальные уравнения, которые, однако, как правило, неразрешимы. Объясняется это тем, что дифференциальное уравнение описывает целый класс процессов, в пределах которого действуют применяемые законы, и не учитывает частных особенностей отдельных процессов.

Чтобы описать частный процесс, дифференциальное уравнение следует дополнить данными, **характеризующими этот частный процесс**. Такие данные называются **условиями однозначности** и позволяют из всего класса процессов, описываемого данным дифференциальным уравнением, выделить конкретный единичный процесс.

Если процессы описываются одним и тем же дифференциальным уравнением или системой дифференциальных уравнений **при подобных условиях однозначности, такие процессы подобны**.

К условиям однозначности относятся **геометрические условия**, характеризующие размеры и форму аппарата, в котором протекает процесс; **физические свойства среды**; **граничные условия**, характеризующие взаимодействие среды с телами, ограничивающими объём, в котором протекает процесс; **начальные условия системы**, т. е. её состояние в момент, когда начинается изучение процесса.

Условия однозначности являются индивидуальными признаками различных процессов, входящих в один и тот же класс. По этим признакам и можно выделить из класса процессов **один частный процесс**.

Теория подобия позволяет распространить результаты одного опыта на группу подобных процессов в пределах данного класса путём особого способа задания условий однозначности. Это обстоятельство позволяет переносить экспериментальные данные, полученные на модели, на промышленный объект, т. е. моделировать процесс. Для выделения из класса процессов группы подобных условия однозначности задаются в виде ряда подобных значений параметров или в виде произведения соответствующих параметров на **постоянные множители – масштабные коэффициенты**.

Таким образом, условия однозначности различаются на масштабный коэффициент.

Подобие условий однозначности включает **геометрическое подобие аппаратов**, подобие физических величин, временное подобие, подобие граничных и начальных условий.

Подобными называются явления, для которых постоянны отношения характеризующих их величин. Условия подобия рассмотрим на простейшем примере геометрического подобия. Подобные фигуры отличаются друг от друга только масштабом и могут быть получены одна из другой умножением сходственных размеров одной из них на некоторый масштабный постоянный множитель (константу подобия).

Например, если размеры сторон одного треугольника a , b и c , а размеры сходственных сторон подобного ему треугольника составляют a' , b' , c' , то:

$$\frac{a}{a'} = \frac{b}{b'} = \frac{c}{c'} = K_1 = const$$

Однако соблюдение геометрического подобия аппаратов является условием **необходимым, но не достаточным**. При подобии физических процессов должны быть подобны все основные физические величины, влияющие на него. Поэтому технологические процессы подобны только при соблюдении так называемых условий однозначности, т. е. совместного обеспечения геометрического и временного подобия, подобия полей физических величин, а также начальных и граничных условий.

Сформулируем эти условия на примере подобного движения вязкой жидкости в производственном трубопроводе (оригинале) и в его уменьшенной модели (рисунок 2.1).

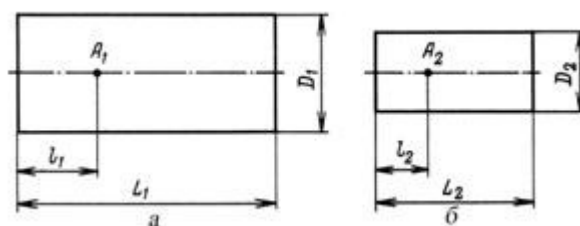


Рисунок – К определению условий подобия натуры (а) и модели (б)

Для этого рассмотрим любые сходственные точки, лежащие, например, на оси труб: A_1 , A_2 и т. д.

Геометрическое подобие соблюдается при равенстве отношений всех сходственных линейных размеров оригинала и модели:

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{D_1}{D_2} = \frac{l_1}{l_2} = \dots = const = K_1$$

При подобном движении сходственных частиц их траектории в оригинале и модели должны быть подобны. Это условие называют кинематическим подобием.

Временное подобие (гомохронность) характеризуется тем, что сходственные частицы в геометрически подобных системах, двигаясь по геометрически подобным траекториям, проходят подобные пути за промежутки времени, отношение которых является постоянной величиной, т. е.:

$$\frac{T}{T'} = \frac{\tau_1}{\tau'_1} = \frac{\tau_2}{\tau'_2} = \dots = \text{const} = K_\tau$$

где T, T' – время прохождения сходственными частицами трубопровода и его модели.

При соблюдении геометрического и временного подобия будет соблюдаться также подобие скоростей:

$$\frac{v_0}{v'_0} = \frac{v_1}{v'_1} = \dots = \text{const} = K_v$$

Подобие физических величин предполагает, для двух любых сходственных точек оригинала и модели, размещённых подобно в пространстве и времени, отношения физических свойств являются величинами постоянными. Так, например,

$$\frac{\rho_0}{\rho'_0} = \frac{\rho_1}{\rho'_1} = \dots = \text{const} = K_\rho;$$

$$\frac{\mu_0}{\mu'_0} = \frac{\mu_1}{\mu'_1} = \dots = \text{const} = K_\mu \quad \text{и т.д.}$$

Подобие начальных и граничных условий предполагает, отношения основных параметров в начале и на границе оригинала и модели являются соответственно величинами постоянными.

Подобие потоков в оригинале и модели можно охарактеризовать также с помощью **инвариантов подобия**, т. е. в виде отношений сходственных величин в пределах каждой системы. Так:

$$\frac{L_1}{l_1} = \frac{L_2}{l_2} = \text{idem} = i_l$$

Величина i_l – представляет собой **инвариант подобия геометрических величин**.

Инварианты подобия, выраженные отношением двух однородных физических величин с одинаковыми размерностями, называются симплексами. Однако инварианты подобия могут быть выражены также отношениями разнородных величин, т. е. представлять собой их безразмерные комплексы. Например, для сходственных точек подобных потоков в трубопроводе и его модели равны **инварианты подобия**, состоящие из различных физических величин:

$$\frac{v d \rho}{\mu} = \frac{v' d' \rho'}{\mu'} = \text{idem} = Re$$

Безразмерные комплексы, составленные по такому типу, называются критериями подобия. В уравнении (2.11) это критерий Рейнольдса. Критерии подобия всегда имеют физический смысл, являясь мерами соотношения между какими-то двумя эффектами (силами и т. п.), существенными для рассматриваемого процесса. Критерии подобия обладают всеми свойствами инвариантов: они безразмерны, могут изменять свою величину от точки к точке данной системы и т. д.

Критерии подобия могут быть получены для любого процесса, если известны аналитические зависимости между характеризующими его величинами – дифференциальные уравнения, описывающие процесс.

Однако дифференциальные уравнения описывают целый класс однородных по своей сущности явлений и для выделения из него конкретного необходимо ограничить указанные уравнения дополнительными условиями (условиями однозначности). Они включают: геометрическую форму и размеры системы, существенные для данного процесса физические константы участвующих в нём веществ, начальные и граничные условия, временное подобие. Таким образом, дифференциальные уравнения должны решаться в совокупности с условиями однозначности в устанавливаемых последними пределах.

Основные положения теории подобия обобщаются тремя теоремами подобия, лежащими в основе практического применения теории подобия.

3.2 Основы теории подобия

Теория подобия устанавливает правила построения модели, порядок проведения экспериментов на модели и возможность и перенесения результатов, полученных на модели, на реальные машины и аппараты.

Дифференциальные уравнения описывают целый класс процессов, в пределах которых действуют общие физические законы. Чтобы описать частный процесс, дифференциальные уравнения следует дополнить условиями однозначности:

- сведения о геометрических свойствах системы,
- начальные и граничные условия системы,
- условия взаимодействия системы с окружающей средой.

Из величин, входящих в условия однозначности, составляются безразмерные комплексы, называемые определяющими критериями подобия.

В свою очередь, критерии подобия, в состав которых входит хотя бы одна величина, не входящая в условия однозначности, называются определяемыми.

3.3 Три теоремы подобия

Из трех основных теорем подобия следует:

- какие величины надо определять;
- в какой форме надо представлять результаты опытов;
- на какие случаи расчетной практики можно распространить результаты опытов.

Первая теорема подобия (Ньютона). Подобные между собой явления имеют численно одинаковые критерии подобия.

Вторая теорема подобия (Бэкингема и Федермана). Решение дифференциального уравнения может быть представлено в виде зависимости между критериями подобия, полученными из этого уравнения

$$K_1 = f(K_2, K_3),$$

где K_1 – определяемый критерий подобия; K_2, K_3 – определяющие критерии подобия. Обычно это степенная функция, вид ее определяется из опыта.

Третья теорема подобия (Кирпичева и Гухмана). Явления между собой подобны, если они описываются одной и той же системой дифференциальных уравнений и имеют подобные условия однозначности.

Подобие условий однозначности включают в себя:

- геометрическое подобие аппаратов;
- временное подобие: отношение между интервалами завершения аналогичных стадий процесса в аппаратах сохраняется постоянным;

Подобие физических величин: подобие силовых полей, полей скоростей, полей температур или полей концентраций, подобие физических свойств изучаемых сред в сходственных точках модели и натурального образца;

- подобие граничных и начальных условий.

Метод анализа размерностей (π -теорема)

Используемые в технологических процессах вещества обладают различными физическими свойствами (вязкостью, плотностью и т. п.), а их состояние и условия проведения процесса характеризуется различными параметрами (температурой, давлением, скоростью и т. п.), которые могут измеряться в различных единицах.

Выражение данной физической величины через величины, положенные в основу определённой системы единиц (обычно СИ), называют размерностью этой величины. Одна и та же физическая величина может иметь разную размерность в различных системах единиц.

Если неизвестно исходное уравнение, описывающее данное явление (процесс), то для формирования критериев подобия можно использовать анализ размерностей – учение о методах рационального построения систем единиц измерения. При этом величины разделяются на первичные, численные значения которых устанавливают прямым измерением, и вторичные, определяемые как функции первичных. Вторичная величина, выраженная через первичные, всегда представляет собой степенной комплекс, записываемый в виде формулы размерности, т. к. только в этом случае отношение одноименных величин не зависит от выбора единиц. Это условие совпадает с требованием равенства размерностей величин в левой и правых частях получаемого уравнения. Формула размерности какой-либо физической величины A имеет вид

$$[A] = L^i M^m T^{\tau} \dots,$$

где $[A]$ – символ размерности определяемой (вторичной) физической величины; $L, M, T, \dots$ – символы измеренных (первичных, основных) физических величин (длины, массы, времени и т. д.); $i, m, \tau, \dots$ – целые или дробные, положительные или отрицательные числа, называемые показателями размерности, или размерностью, определяемой величины A . Так, формула размерности для ускорения a записывается в виде $[a] = LT^{-2}$, для силы F – в виде $[F] = LMT^{-2}$, и т. д.

Выбор числа первичных (основных) физических величин в принципе произволен, но практические соображения приводят к некоторому ограничению свободы в выборе этих величин и их единиц.

Если для исследуемого процесса установлено, какие величины влияют на искомую (вторичную) величину, но вид связи между ними неизвестен, то можно составить уравнение размерностей, в кото-

ром в левой части будет стоять символ искомой величины со своим показателем размерности, а в правой – произведение символов величин, от которых искомая величина зависит, но с неизвестными показателями размерности. Задача нахождения связи между физическими величинами сводится в этом случае к отысканию соответствующих показателей размерности.

Метод анализа размерностей предполагает тщательный анализ действующих факторов и составление из них критериальных уравнений исследуемого явления. Порядок решения задач методом теории размерностей:

1. Составляется перечень независимых факторов, определяющих явление.
2. Выполняются формальные преобразования.

Составляется перечень независимых размерностей. Для этого выписывают размерности учитываемых параметров и вычёркивают зависимые и повторяющиеся размерности.

Определяют разность между количеством определяющих параметров и количеством их независимых размерностей. она равна числу критериев, полностью описывающих исследуемое явление.

Комбинируя определяющие параметры, составляют необходимое количество независимых безразмерных комбинаций, которые являются определяющими критериями. Критерии анализируют с целью идентификации – определения соответствия их известным.

3. Связи между критериями устанавливают в одной из удобных для использования форм. Если форма этой связи заранее неизвестна, рекомендуется представить её в виде зависимости искомого критерия от произведения других критериев в соответствующих степенях. Эти степени и постоянный коэффициент определяются экспериментально.

Для *примера* выясним связь параметров, определяющих характер стационарного течения вязкой жидкости по трубопроводу.

1. В заданном случае трубопровод характеризуется диаметром (d) и шероховатостью внутренних стенок (Δ). Параметры жидкости, принимаемые во внимание плотность (ρ) и вязкость (μ). Все другие параметры, характеризующие жидкость как физическое тело, не являются в данном случае существенными. В частности, химический состав, растворимость газов, давление, температура и т. п. проявляются как факторы, влияющие на плотность или вязкость, но не непосредственно. Движение жидкости по трубопроводу характеризуется только скоростью (v).

Перечень включает пять определяющих параметров.

2. Формальные преобразования.

2.1. Получим перечень независимых размерностей. Для этого выпишем размерности определяющих параметров:

$$[d] = L; [\Delta] = L; [\rho] = \text{кг} / \text{м}^3 = G / L^3;$$

$$[\mu] = \text{кг} / (\text{м} \cdot \text{с}) = M / (LT); [v] = \text{м} / \text{с} = L / t,$$

где M , L , T – размерности массы, длины и времени.

Независимыми размерностями в этом перечне являются размерности массы, длины и времени, т. е. всего три размерности.

2.2. В соответствии с π -теоремой анализируемое явление должно определяться двумя безразмерными комплексами: $\pi = 5 - 3 = 2$.

2.3. Комбинируя размерные величины перечня определяющих параметров, получим следующие два безразмерных критерия:

$$\frac{\Delta}{d}; \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\mu}.$$

Первый из идентифицируемых критериев – симплекс, отношение средней высоты микрошероховатостей стенок к диаметру трубы. Его называют относительной шероховатостью или просто шероховатостью трубы. Второй комплекс параметров – критерий Рейнольдса (Re). Два этих комплекса и определяют режимы течения.

Метод анализа размерностей не универсален; он требует предварительного знания числа переменных, от которых зависит данное явление, проведения большого объёма экспериментов как для определения переменных величин, влияющих на данное явление, так и для установления конкретной степенной зависимости типа уравнения (2.18). Если не учесть хотя бы одну из величин, существенно

влияющих на исследуемый процесс, то при получении конечного расчётного уравнения это может привести к серьёзной ошибке. Поэтому метод анализа размерностей, в отличие от теории подобия, имеет ограниченное применение.

3.6. Основные критерии гидродинамического и теплового подобия

Динамическое подобие – это пропорциональность сил, действующих на сходственные объёмы в кинематически подобных объектах и равенство углов, характеризующих направление этих сил.

На физическое тело действуют различные силы – силы тяжести, силы давления, силы трения (вязкости) и т.д. Соблюдение их пропорциональности означает полное динамическое подобие. На практике обычно имеют дело с частичным (неполным) подобием, при котором соблюдается пропорциональность лишь основных, главных сил. Если принять за основу силу инерции и сравнивать другие силы с этой «эталонной» силой, то можно получить множество критериев динамического подобия.

Критерии подобия механического движения получается из уравнения, выражающего второй закон Ньютона и называется критерием (числом) Ньютона.

Это безразмерный комплекс величин, значения которого одинаковы для сходственных точек.

$$\frac{F\tau}{m\nu} = idem = Ne$$

где F – действующая на тело сила, m – его масса, t – время, l – характерный линейный размер.

Зная, что $\tau = l/\nu$ перепишем уравнение (2.15) в следующем виде

$$\frac{Fl}{m\nu^2} = Ne$$

Критерий Ньютона характеризует отношение действующих на частицу сил к силе инерции.

В гидромеханике важнейшими критериями являются число Рейнольдса $Re = \rho V l / \mu = V l / \nu$, число Маха $M = V/a^*$ и число Фруда $Fr = V^2 / g l$, где ρ – плотность жидкости или газа, V – скорость течения, μ – динамический коэффициент вязкости, $\nu = \mu / \rho$ – кинематический коэффициент вязкости, a^* – местная скорость распространения звука в движущейся среде. Каждый из критериев подобия имеет определенный физический смысл как величина, пропорциональная отношению однотипных физических величин. Так, число Re характеризует отношение инерционных сил при движении жидкости или газа к силам вязкости, а число Fr – отношение инерционных сил к силам тяжести. Число, или критерий Галилея (Ga) – один из критериев подобия, использующийся в гидродинамике и теплопередаче (показывает соотношение между силами гравитации и силами вязкости в среде) и получающийся из комбинации других критериев подобия: $Ga = Re^2 / Fr$.

В процессах, изменяющихся с течением времени t , основным критерием подобия, характеризующим одинаковость протекания процессов во времени, является критерий гомохронности $Ho = Vt/l$. В задачах гидроаэромеханики нестационарных течений этот критерий обычно называется числом Струхала Sh . Критерий гомохронности в случае подобия электродинамических явлений записывают в виде $Ho = \omega t$, где ω – характерная частота.

3/7. Тепловое подобие. Критерии подобия

Основные критерии подобия гидромеханических тепловых и массообменных процессов

Критерий	Символ, формула и наименование величин	Основной физический смысл
1. Критерий режима движения (число Рейнольдса)	1. Критерии гидромеханического подобия В прямых гладких трубах $Re = w/y = Re/Pr$; R 2320	Характеризует режим движения жидкости; мера отношения сил инерции и молекулярного трения в потоке
2. Критерий гидравлического подобия (число Фруда)	При $Re < 2320$ — ламинарный режим, при $Re > 10^4$ — устойчивый турбулентный $Fr_{sw}^2/(gl) = R_e^2/Ga$	Мера отношения сил инерции и тяжести в потоке
3. Критерий подобия полей давления (число Эйлера)	где Δp — перепад давления, Па	Мера отношения сил давления и инерции в потоке. Безразмерная потеря напора жидкостей в трубах
4. Критерий подобия полей свободного движения (число Галилея)	$Ga = gl^3/v^2 = Re^2/Fr$, где g — ускорение силы тяжести	Мера отношения сил молекулярного трения и тяжести в потоке
5. Критерий свободной конвекции (число Архимеда)	$\frac{g \Delta \rho}{\rho} = \frac{g l^3}{\nu^2} \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1} = \frac{\Delta \rho}{\rho_1} \frac{g l^3}{\nu^2}$, где ρ_1 и ρ_2 — плотности жидкости в двух точках потока, kg/m^3	Характеризует взаимодействие архимедовой силы, возникающей при разности плотности среды и силы вязкого трения
6. Безразмерный коэффициент теплоотдачи (критерий Нуссельта)	II. Критерии теплового подобия $Nu = a/l$, где a — коэффициент теплоотдачи, $Вт/(м^2 \cdot К)$; A — коэффициент теплопроводности, $Вт/(м \cdot К)$; l — характерный линейный размер системы, м	Характеризует связь между интенсивностью теплоотдачи и температурным полем в пограничном слое потока
7. Критерий подобия температурных и скоростных полей в потоке (число Прандтля)	$Pr = \nu/a = \eta c_p / \lambda = Re/Re_p$, где ν — кинематическая вязкость, $м^2/с$; a — температуропроводность, $м^2/с$; η — динамическая вязкость, $кг/(с \cdot м)$; c_p — удельная теплоемкость, $Дж/(кг \cdot К)$ $Re = w l / \nu = Re_p$	Характеризует физические свойства жидкости (безразмерная величина)
8. Критерий теплового подобия (число Пекле)		Мера отношения молекулярного и конвективного переносов тепла в потоке

- 1_ Прандтля число $Pr = \eta/a = mcp/l$,
 2_ Нуссельта число $Nu = al/l$,
 3_ Грасгофа число $Gr = bgl^3DT/\eta^2$,
 4_ Пекле число $Pe = ul/a$
 Здесь a – коэффициент теплопередачи,
 l – коэффициент теплопроводности,
 c_p – удельная теплоёмкость жидкости или газа при постоянном давлении,
 $a = l/mcp$ – коэффициент температуропроводности,
 Два последних числа связаны с предыдущими соотношениями:
 $Pe = Pr \cdot Re$
 Для распространения тепла в твёрдом теле характерны критериями подобия:
 1_ Фурье (число) $Fo = at/l^2$ и
 2_ число Био $Bi = al/l$. Число Bi определяет характер соответствия между температурными условиями в окружающей среде и распределением температуры.

Контрольные вопросы:

1. В чём заключается принцип моделирования технологических процессов?
2. Что такое математическое и физическое моделирование?
3. Перечислите этапы математического моделирования.
4. Какие известны подходы к математическому моделированию? Когда они используются?
5. В каком случае используется теория подобия для моделирования процессов?
6. Что такое условия однозначности? Какие из них Вам известны?
4. Какие инварианты подобия называются симплексами? В чём их отличие от критериев подобия?
8. Сформулируйте теоремы подобия. Объясните смысл индикатора подобия.
9. Для чего используется π -теорема? Проиллюстрируйте её применение.
10. Объясните сущность метода анализа размерностей и последовательность его реализации.
11. В каких случаях используется метод анализа размерностей и в чём его недостатки?

Тема 4. Измельчение, прессование и формование сырья

Цель занятия: изучение процессов и аппаратов для измельчения, прессования и формования

Задачами занятия является освоение:

1. Методов измельчения, прессования и формования.
3. Выполнение расчетов отдельных показателей по заданию преподавателя.

Формируемые компетенции

Код	Формулировка:
ОПК-3	способен использовать знания инженерных процессов при решении профессиональных задач и эксплуатации современного технологического оборудования и приборов
ПК-5	способностью проводить проектные расчеты, обосновывать и осуществлять технологические компоновки, подбор оборудования для производственных технологических линий, основ-

	ных и вспомогательных помещений, в том числе с использованием информационных технологий
--	---

Теоретическая часть

(При этой части необходимо также использовать соответствующую тему из ЭКЛ)
Сущность и область применения процесса измельчения

Процесс уменьшения размеров твёрдого тела от первоначальной (исходной) крупности до требуемой путём воздействия внешних сил называется дроблением или помолом, а машины, применяемые для этих целей, дробилками или мельницами. Если одновременно с уменьшением размеров куска им придаётся определённая форма, процесс измельчения называется резанием. Машины, применяемые для этих целей, называются резательными.

Процесс измельчения широко применяется в мясном, консервном, спиртовом, пивоваренном, крахмало-паточном, свеклосахарном, мукомольном и других производствах.

Способы дробления

По характеру применяемых усилий способы дробления могут быть классифицированы как дробление при помощи удара, раздавливания, раскалывания, истирания и излома (рисунок 3..2). При измельчении обычно имеет место несколько сопутствующих видов измельчения. Выбор способа измельчения зависит от крупности и прочности кусков измельчаемого материала. Твёрдые и хрупкие материалы измельчаются раздавливанием и ударом, прочные и вязкие – раздавливанием, вязкие материал средней прочности – истиранием, ударом и раскалыванием.

Наиболее точно степень дробления определяется соотношением средневзвешенных размеров кусков исходного и конечного материалов

$$i = \frac{D_{св}}{d_{св}} .$$

Разделяют дробление крупное, среднее, мелкое и тонкое, а также коллоидный размол (таблица 3.1). Такое разделение, хотя и условное, но всё же помогает классифицировать аппарат для дробления.

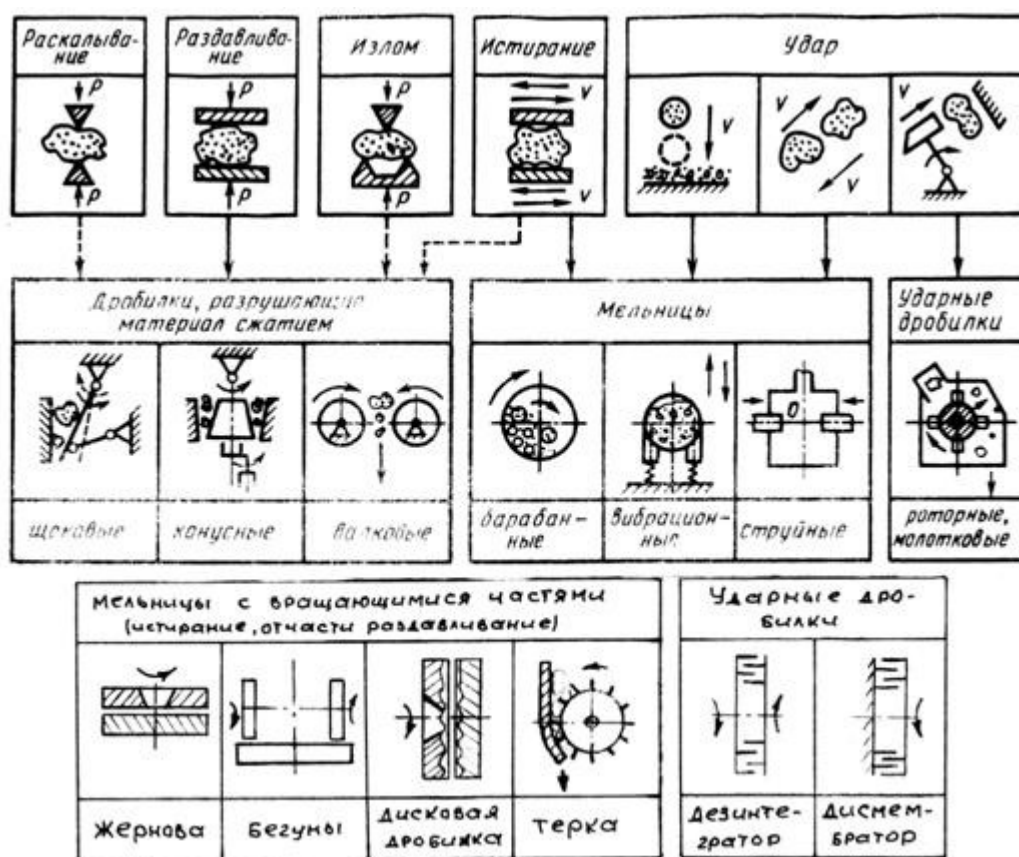


Рисунок 3..2 – Способы механического разрушения материалов, реализуемых в дробилках и мельницах

Диспергатор РПА Гомогенизатор Роторно-пульсационный аппарат Кавитатор (ВИДЕО)

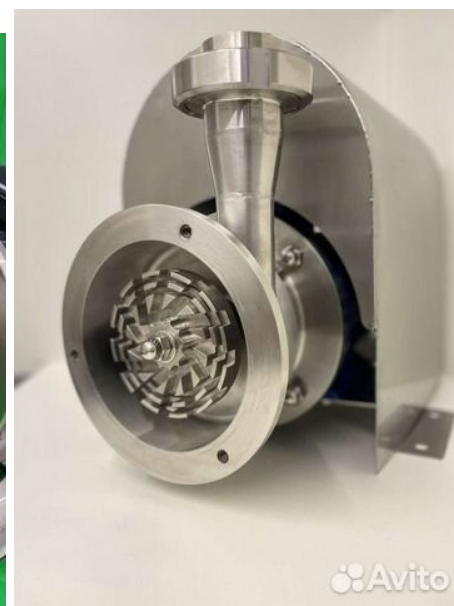


Таблица – Характерные размеры частиц для разных типов дробления

Тип дробления	Размер частиц материала, мм	
	поступающих на дробление	после дробления
Крупное	1000–200	250–40
Среднее	250–25	40–10
Мелкое	50–25	10–1
Тонкое	25–3	1–0,4
Коллоидный размол	0,2–0,1	0,001

Крупное и среднее измельчение проводится сухим способом, а мелкое и тонкое – мокрым способом обычно в воде. При мокром измельчении частицы продукта имеют более равномерную величину. При этом снижается образование пыли и упрощается выгрузка готового продукта.

3.3 Основные энергетические гипотезы дробления

Количество энергии, необходимое для измельчения какого-либо материала до определённого размера, зависит от многих факторов: размера, формы, взаимного расположения кусков, прочности, хрупкости, однородности исходного материала, его влажности, вида и состояния рабочих поверхностей машины и др. Поэтому установить аналитическую зависимость между расходом энергии на измельчение, физико-механическими свойствами измельчаемого материала и результатами процесса можно лишь в самом общем виде.

Исследованием энергоёмкости процесса измельчения занимаются давно. В 1867 г. проф. П. Риттингер впервые выдвинул гипотезу о том, что работа, расходуемая на измельчение материала, **пропорциональна вновь образованной поверхности**:

$$A = K \Delta F ;$$

где K – коэффициент пропорциональности; ΔF – **приращение поверхности (вновь образованной поверхности)**.

Впоследствии эта гипотеза была названа первым законом дробления или законом поверхностей.

Размер вновь образованной поверхности можно выразить через начальные и конечные размеры дробимого материала, и если дроблению подвергается не один кусок, а $Q \text{ (м}^3\text{)}$ материала со средним размером кусков, равным $D_{св}$, то окончательная формула, выражающая закон Риттингера,

$$A = K_R (i - 1) \frac{Q}{D_{св}} .$$

Определить коэффициент пропорциональности K_R между затраченной работой и вновь обнажённой поверхностью весьма трудно, что, безусловно, снижает практическое значение данной формулы.

В 1885 г. проф. Ф. Кик, основываясь на формуле из теории упругости, по которой работа деформации

$$\bar{A} = \sigma_{сж}^2 \frac{V}{2E} ,$$

где $\sigma_{сж}$ – напряжение, возникающее при деформации; V – объём деформируемого тела; E – модуль упругости,

выдвинул гипотезу, что энергия, необходимая для одинакового изменения формы геометрически подобных и однородных тел, пропорциональна объёмным или массам этих тел.

Эта гипотеза названа вторым законом дробления или законом объёмов.

Позже было доказано, что проф. В. Л. Кирпичев предложил ту же зависимость значительно раньше Ф. Кика, а именно в 1874 г., основываясь на общем законе подобия. Поэтому второй закон дробления называется законом Кирпичева–Кика.

Согласно этому закону работа дробления одного **куска размером D** будет

$$A = K_2 D^3,$$

где K_2 – коэффициент пропорциональности.

Если также принять, что на дробление поступает Q (kz) материала со средним размером кусков $D_{св}$ то окончательно, выполнив соответствующие преобразования, получим

$$A = K_k Q \lg \frac{D_{св}}{d_{св}}.$$

Данная формула выражает закон Кирпичева–Кика.

После опубликования указанных законов дробления появились работы, посвящённые их анализу и сопоставлению. Мнения ученых разделились. Одни считали, что законы Кирпичева–Кика и Риттингера справедливы для разных стадий измельчения: закон Кирпичева–Кика определяет энергию, затрачиваемую на упругую деформацию материала и не учитывает вновь образованной поверхности, и поэтому закон справедлив для процессов дробления, где основная энергия тратится на деформацию материала; закон Риттингера не учитывает затраты энергии на упругую деформацию и более подходит для процессов помола, где преобладает истирание с интенсивным образованием новой поверхности.

Другие учёные утверждали, что неправильно применять законы Кирпичева–Кика и Риттингера раздельно для разных стадий процесса измельчения. Эти законы дополняют один другой и действуют совместно.

В 1940 г. акад. П. А. Ребиндер предложил формулу расхода энергии при измельчении, в которой суммируются работы, затрачиваемые на деформацию разрушаемых кусков, и на образование поверхностей:

$$A = K \Delta V + \sigma \Delta F, \quad 3.6$$

где K , σ – коэффициенты пропорциональности; ΔV – деформированный объём; ΔF – вновь образованная поверхность.

Формула П. А. Ребиндера не получила широкого распространения ввиду отсутствия надёжных рекомендаций по методике выбора значений коэффициентов пропорциональности для конкретного случая.

Требования к дробилкам, устройство и работа их основных типов

Материалы, подвергавшееся дроблению на пищевых производствах, очень разнообразны. Столь же разнообразны и типы дробилок, которые приспособлены для дробления этих материалов. Несмотря на разнообразие типов, могут быть сформулированы некоторые общие требования, которым должна удовлетворять любая дробилка:

- конструкция машины должна обеспечивать возможность быстрой и лёгкой смены всех изнашивающихся частей, особенно дробящих материал;
- продукт после дробления должен состоять из кусков одинакового размера, а конструкция дробилки должна допускать по возможности быстрое и лёгкое изменение степени дробления;
- при дроблении сухих материалов должно обеспечиваться минимальное пылевыделение;
- раздробленный до необходимой степени материал должен немедленно удаляться из дробилки во избежание излишнего измельчения, сопряжённого с излишней тратой энергии;

- дробилка должна иметь возможно меньшую массу и размеры;
- дробилка должна быть снабжена предохранительными конструктивными элементами, которые при их поломке или деформации предотвращали бы аварию всей конструкции.

По принципу действия и конструкции различают следующие основные типы дробилок (рисунок 3..2):

1) В щёковых дробилках материал измельчается в основном раздавливанием в камере между щёками при периодическом их сближении. При отходе подвижной щеки от неподвижной измельчённый материал выпадает из дробилки. При сжатии частиц имеет место их относительное перемещение, за счёт чего они истираются. При рифлёных рабочих поверхностях щеек раздавливанию сопутствует раскалывание и излом частиц. Дробилка применяется для крупного и среднего дробления;

2) В конусных (гирационных) дробилках материал разрушается раздавливанием, изломом и истиранием при обкатывании подвижного конуса внутри неподвижного, за счёт чего происходит периодическое сближение и отход рабочих поверхностей конусов, в принципе, как и в щёковых дробилках. Дробилка применяется для крупного дробления;

3) В валковых (вальцовых) дробилках материал измельчается в сужающемся пространстве между вращающимися навстречу друг другу валками путём раздавливания, а при рифлёных и зубчатых валках также раскалыванием и изломом. Дробилки применяются для среднего, мелкого и тонкого дробления;

4) В роторных и молотковых дробилках ударного действия частицы материала разрушаются при ударе по ним вращающихся бил или молотков и соударений отброшенных частиц с отражательным элементом машины. Дробилки применяются для среднего, мелкого и тонкого дробления хрупких и не слишком твёрдых материалов;

5) В шаровых барабанных мельницах материал измельчается во вращающемся барабане, при ударе мелющих тел (шаров), падающих с некоторой высоты, и истирании при относительном движении мелющих тел и частиц материала. Мельницы применяются для мелкого и тонкого помола;

6) В вибрационных мельницах материал измельчается в барабане, заполненном мелющими телами при ударе и истирании, возникающих при высокочастотных колебаниях корпуса. Мельницы предназначены для тонкого и сверхтонкого помола, применяются и для тонкого дробления;

7) В струйных мельницах материал измельчается истиранием при соударении частиц между собой и со стенками камеры при хаотическом движении частиц в газовом потоке высокой турбулентности. Мельницы служат для тонкого дробления;

8) В мельницах с вращающимися частями (жернова, бегуны, дисковая дробилка, тёрка) материал непрерывно истирается и отчасти раздавливается. Все они применяются для мелкого и тонкого дробления;

9) В дезинтеграторах и дисмембраторах материал измельчается ударами бил. Каждый ряд бил одного диска расположен между двумя рядами бил другого диска. Этот тип дробилок обеспечивает тонкий помол материала и особенно рекомендуется для механической активизации дробимых материалов;

10) В мельницах коллоидного дробления измельчение производится в малых зазорах между вращающимися частями в присутствии дисперсионной среды (жидкость или иногда – газ), предотвращающей слипание частиц.

Резание

Резание – технологический процесс обработки путём разделения материала с нарушением его целостности, осуществляемый **режущим инструментом с целью получения заданной формы, размеров и качества поверхностных слоёв**. Применительно к пищевым продуктам резание должно быть осуществлено по возможности без отходов.

Резание как один из технологических процессов обработки пищевых материалов широко применяется в различных отраслях пищевой промышленности: разрезание жгутов и пластов кондитерских масс на отдельные корпуса; отделение куска от тестовой массы; резание туши или большого куска мяса на части; порционирование рыбы и мяса; резание овощей и фруктов и т. п.

Материалы, подвергаемые резанию, имеют разнообразные физико-механические свойства (хрупкая кондитерская масса, упруго-пластичное волокнистое мясо, вязко-пластичное мыло). Они могут быть однородными (тесто, кондитерская масса) или неоднородными (рыба, хлеб, табак), изотропными (мыло, тесто) или анизотропными (мясо, рыба), иметь в своём составе более прочные элементы по сравнению с основной массой (волокна, кости). Помимо этого разрезаемые материалы могут быть в естественном состоянии или предварительно подвергнуты дополнительной обработке (подпрессовка табака, формование и охлаждение мяса при порционировании). В зависимости от реологических свойств материала выбираются способ резания, вид режущего инструмента, скорости резания и подачи продукта. На качество среза и конечную форму продукта влияют тип ножа, характер заточки режущей кромки, соотношение скоростей резания и подачи.

При резании одна часть материала отделяется от другой в результате разрушения граничного слоя (рисунок 3.3). Разрушению материала предшествуют упругая и пластическая деформации, величина которых зависит от строения материала, скорости деформирования, физико-механических свойств. Сначала создаётся упругая, а затем и пластическая деформация, и материал разрушается по линии наибольшего напряжения тогда, когда оно становится равным пределу прочности материала. В зависимости от состояния и характера приложения силы материал разрушается при растяжении или срезе. Работа резания расходуется на создание упругой и пластической деформации, а также на преодоление трения инструмента о разрезаемый материал. Работу резания можно определить теоретическим путём, зная удельную работу резания $\left(\frac{Дж}{м^2} \right)$.

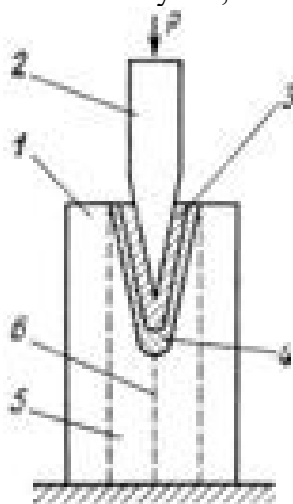


Рисунок – Схема резания материала:

1 – разрезаемый материал; 2 – режущий инструмент; 3 – зона пластической деформации; 4 – зона упругой деформации; 5 – граничная зона; 6 – линия разрушения

Закономерности резания рассматриваются как результат взаимодействия системы: устройство – инструмент – материал. Любой вид резания характеризуется режимом резания, который определяется скоростью резания, глубиной резания и скоростью подачи. Эффективность резания зависит от рациональных режимов, учитывающих все влияющие факторы.

Условно различают два способа резания: статический (режущий инструмент перемещается нормально лезвию) и скользящий (режущий инструмент перемещается по двум взаимно

перпендикулярным направлениям – нормально и параллельно лезвию). Первый из них часто называют рубкой, а второй – резкой.

Рубка применяется при разделении конфетных охлаждённых бесконечных жгутов на отдельные корпуса гильотинными ножами, тестовой массы в процессе её деления при формовании. Скользящее резание осуществляется при резании хлеба и сухарных плит, мясопродуктов и рыбы, халвы и грильяжа.

При нормальном резании режущий инструмент вначале значительно локально уплотняет материал, а затем разрушает его, при этом образуются новые поверхности среза. Способ пригоден в тех случаях, когда к качеству поверхности среза не предъявляют высоких требований, т. к. поверхность получается шероховатой и часто наблюдается появление отходов. Таким образом, способ нормального резания пищевых материалов следует применять только в случаях, если предусмотрена их дальнейшая технологическая обработка (например, глазирование конфетных корпусов, округление и закатка тестовых кусков и т. п.).

При скользящем резании режущая кромка инструмента создаёт местное уплотнение материала, при этом образуется более гладкая поверхность среза. Это резание широко применяется для пищевых материалов.

Машины и устройства для резания любых пищевых материалов могут быть разделены по следующим функциональным признакам:

по назначению: для хрупких, твёрдообразных, упруго-вязко-пластичных и неоднородных материалов;

по принципу действия: периодического, непрерывного и комбинированного;

по виду режущего инструмента (рисунок 3..4): пластинчатые, дисковые, струнные, гильотинные, роторные, струйные (жидкостные и пневматические), ультразвуковые, лазерные (два последних не нашли применения в пищевой промышленности);

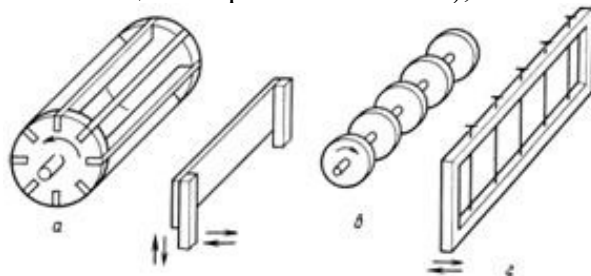


Рисунок 3..4 – Вид режущих инструментов:

а – ротор; б – гильотинный нож; в – дисковый нож; г – струна

по движению рабочего инструмента: с вращательным, возвратно-поступательным, плоскопараллельным, поворотным, вибрационным;

по перемещению материала;

по способу крепления материала;

по виду привода.

Классифицируя развёрнуто режущий инструмент, можно отметить его следующие признаки:

– вид: **пластина, диск, ротор, цилиндр, конус, винт, серп, струна, струя, луч, колеблющаяся среда, призмат;**

– **форма режущей кромки: гладкая, зубчатая, фигурная;**

– характер заточки: односкосный, двухскосный, многогранный, без заточки;

– способ очистки инструмента от залипания: подогрев, охлаждение, механический, комбинированный.

Прессование и формование

Распределённое по поверхности силовое воздействие на твёрдые тела, зернистые массы или порошки называют прессованием. Осуществляется прессование посредством уменьшения размера или объёма занимаемого объектами прессования пространства. Применяют также самопрессование за счёт гравитационных или инерционных (центробежных) сил.

Среди механических процессов прессование занимает промежуточное положение, оно применяется и для создания однородных систем, и для их разделения.

При прессовании могут преследоваться различные цели:

- отделение жидкости от твёрдого тела. Этот процесс неразрывно связан с фильтрацией отжимаемой жидкости через капилляры остатка. Одновременно с удалением жидкости происходит уплотнение и брикетирование остатка;
- придание пластическим телам определённой геометрической формы (формование и штампование). В этом случае из сложной системы жидкость не отделяется, но обрабатываемая масса принимает необходимую по технологическим условиям форму;
- связывание частиц зернистых сыпучих материалов в более крупные агрегаты определённой формы при помощи связующей жидкости и соответствующего давления (прессование).

В пищевой промышленности процессы прессования подразделяют на следующие виды: отжатие, предназначенное для отделения жидкости от влагосодержащих продуктов; формование и штамповка, предназначенные для придания продуктам, полуфабрикатам определённой геометрической формы; собственно прессование и брикетирование, предназначенные для уплотнения сыпучих материалов или каких-либо разрозненных частиц в плотные агрегаты; экструзия, предназначенная для одновременного воздействия на продукт прессования и нагревания.

Отжатие осуществляется с двоякой целью. Во-первых, для отделения жидкости как более ценного компонента от твёрдого продукта. Обычно, таким образом, получают различные соки для последующего приготовления из них киселей, муссов, соусов.

Во-вторых, для отделения жидкости как менее ценного компонента от твёрдого продукта. Например, отделение сыворотки от творога при приготовлении некоторых кулинарных изделий из него.

Таким образом, отжатие – типичный процесс разделения твёрдых систем, содержащих жидкие фракции. Одновременно он является и процессом образования однородных систем, так как в результате получают однородную жидкость и однородный твёрдый уплотнённый остаток, который может иметь форму брикета.

Формование и штамповка наиболее часто применяются при изготовлении кондитерских изделий и продуктов из теста, а также при приготовлении котлет и т. п. При этом процессе не происходит разделения системы. К процессам формования и штамповки может быть отнесена экструзия, при которой происходят формовка и изменение структуры материала.

Собственно **прессование** или брикетирование применяют для производства, например, мясных формованных продуктов из отдельных кусков после их варки, а также брикетов из отходов сырья и остатков пищи. В результате этих процессов получают однородную массу в виде брикетов, плит.

Экструзией называют процесс **продавливания** материала через профилирующие головки (фильеры-решетки), в результате которого получают продукт требуемой формы. При этом необходимо, чтобы материал продавливался при соответствующих температурах (150-180) и давлениях (100-150 атм). Давление создается специальными прессующими устройствами.

Экструзию все шире применяют в пищевых производствах, поскольку этот процесс открывает большие перспективы при производстве многих продуктов.

Продукты, получаемые с помощью экструзии, имеют повышенные питательные свойства, меньшую плотность, большую гигроскопичность и хрупкость. Они лучше усваиваются организмом человека. При экструзии овощей, мучных изделий они подвергаются бланшированию, которая задерживает окислительные процессы и их порчу.

На процессы прессования оказывают влияние следующие основные факторы: величина давления; свойства и состав материала, особенно его прочность и пористость; размеры материала; продолжительность процесса прессования; термические условия проведения процесса; толщина прессуемого слоя.

В общем случае с увеличением давления эффективность прессования повышается. Однако величина давления при прессовании ограничена технологическими особенностями производства. Избыточное давление часто ведёт к потерям ценных компонентов продукта, попаданию в готовый продукт отходов. Например, при отжати плодов избыточное давление приводит к тому, что в сок попадают частицы кожуры или косточек. Кроме того, увеличение давления при прессовании связано с перерасходом энергии.

Совершенно очевидно, что при прессовании прочных, малопористых продуктов эффективность процесса уменьшается. Такие продукты в меньшей степени подвержены уплотнению, чем мягкие и пористые. Продукты, подвергающиеся брикетированию, не должны содержать компонентов, несовместимых друг с другом. Наоборот, они должны обладать взаимной липкостью. Для этих целей, например, при брикетировании в продукт добавляют связующую жидкость. **Эффективность прессования** зависит от взаимного сцепления частиц, а также действия капиллярных сил, возникающих вследствие уплотнения частиц.

Обратно пропорциональное влияние на эффективность процесса прессования оказывает размер прессуемого материала. Поэтому при прессовании часто прибегают, когда это возможно, к предварительному измельчению исходного материала. Эффективность прессования находится в прямо пропорциональной зависимости от продолжительности процесса. В общем можно утверждать, что с увеличением продолжительности эффективность процесса прессования возрастает.

Наконец, о термических условиях проведения процесса. Здесь тоже есть определенные зависимости, которые связаны со свойствами материала и эффективностью процесса прессования. Во многих случаях при отжати сока из плодов их подвергают нагреванию, которое способствует разрушению структуры и улучшению соковыделения. Нагревание используют при брикетировании.

Толщина прессуемого слоя обратно пропорциональна эффективности прессования. С увеличением толщины прессуемого слоя эффективность прессования резко падает. Например, при прессовании слоя творога высотой 150 мм продолжительность процесса составляет около 25 мин . При уменьшении же высоты слоя в 2 раза продолжительность прессования сокращается в 5 раз .

Общим признаком, характеризующим эффективность всех процессов прессования, является **коэффициент уплотнения**

$$\beta_y = V_n / V_k,$$

где V_n – начальный объём материала, м^3 ; V_k – объём материала после прессования, м^3 .

В расчетах процессов прессования используют также **коэффициент прессования**. Он определяется по формуле

$$K_n = \frac{(V_n - V_k)}{V_n} \cdot 100.$$

Значения коэффициента β_y колеблются в широких пределах от 3 до 20, а значения K_n – от 60 до 95%. Значение этих коэффициентов зависит от свойств прессуемого материала.

При анализе всех процессов прессования иногда используют модифицированный **критерий Фурье**, характеризующий эффективность процесса, который в этом случае имеет вид

$$Fo_n = c\tau / h^2,$$

где Fo_n – критерий Фурье при прессовании; c – константа прессования, $\text{м}^2/\text{с}$; h – высота прессуемого слоя, м .

Константа прессования является величиной, определяемой для каждого продукта экспериментальным путем.

Работа прессования определяется по уравнению

$$A_n = \int_{h_0}^{h_k} F p dh,$$

где A_n – работа прессования, Дж ; F – площадь поперечного сечения прессуемого материала, м^2 ; p – давление прессования, Па ; h_0 , h_k – начальная и конечная высоты материала, м .

Для характеристики процесса отжата наибольшее значение имеет коэффициент пористости. Прежде чем рассмотреть этот коэффициент, необходимо отметить, что в подавляющем большинстве случаев исходный продукт, подлежащий отжатию, имеет сложную структуру – или клеточную, или коагуляционную (рисунок 3.5).

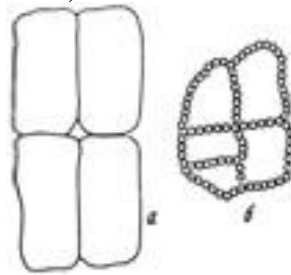


Рисунок – Схема структур продуктов:
а – клеточная; б – коагуляционная

Клеточную структуру имеют продукты растительного и животного происхождения. Коагуляционную структуру имеют продукты, полученные на основе процесса коагуляции. Типичным продуктом, имеющим подобную структуру, является сгусток, образовавшийся в результате коагуляции белков молока. Та и другая структуры продуктов могут быть охарактеризованы наличием скелета и пор (внутриклеточных пространств), заполненных жидкостью.

Скелетом продукта называют оболочки клеток и цепочки частиц белка. Таким образом, продукты, подлежащие отжатию, являются двухфазными системами, состоящими из жидкости и твёрдого вещества.

Отношение общего объёма пор к объёму скелета называют коэффициентом пористости:

$$\varepsilon = V_n / V_c,$$

где V_n – объём пор, или внутриклеточных пространств, м^3 ; V_c – объём скелета, м^3 .

При отжатию за счёт удаления влаги происходит уменьшение пористости. Интенсивность уменьшения пористости зависит от величин внешних и внутренних сил.

Взаимосвязь между толщиной слоя и продолжительностью отжата выражается пропорцией, имеющей вид

$$\tau_1 / \tau_2 = h_1^2 / h_2^2,$$

где τ_1 – продолжительность отжата слоя толщиной h_1 ; τ_2 – продолжительность отжата слоя толщиной h_2 ; h_1, h_2 – высота слоёв, м.

При анализе эффективности формовки и штамповки необходимо учитывать, что им подвергаются продукты, относящиеся к пластично-вязким телам.

Эти тела, как указывалось ранее, способны к упругим деформациям лишь до определённого предела. При переходе за этот предел тесто и фарш начинают необратимо деформироваться и текут, как вязкая жидкость. Течение вязких тел подчиняется закону Бингама.

Для пластично-вязких тел характерно также явление релаксации. Релаксацией (рассасыванием) напряжения называется его уменьшение при постоянной, фиксированной деформации тела. При этом релаксация протекает во времени, т. е. в течение определённого периода. Под периодом релаксации понимают время, в течение которого напряжение при постоянной деформации падает в e раз (e – основание натурального логарифма).

В связи с этим продолжительность формования, штамповки не должна быть меньше периода релаксации. Только в этом случае процесс можно считать завершённым. Например, при нанесении штампом какого-либо рисунка на тесто он будет сохранён, а не затянется при условии, что продолжительность воздействия штампа будет не меньше периода релаксации.

При штамповке тестообразных материалов, нанесении рисунков на них создаваемое напряжение должно составлять величину, определяемую по формуле

$$\sigma = \varepsilon_{ост} \frac{\mu}{\tau},$$

где $\varepsilon_{ост}$ – остаточная деформация; τ – продолжительность штамповки, с; μ – вязкость, Па·с.

В свою очередь величину остаточной деформации можно определить по формуле

$$\varepsilon_{ост} = \delta / h,$$

δ – глубина штампуемого рисунка, м; h – начальная толщина штампуемого изделия, м.

Аппараты для прессования (прессы)

Аппараты для прессования характеризуются большим многообразием: прессы специального назначения, прессы универсального назначения. Ниже рассмотрены лишь основные типы прессов.

К числу прессов специального назначения относятся гидравлические прессы (рисунок 3.6). На материал, подвергаемый прессованию, оказывает усилие поршень большого цилиндра, в котором на основе закона Паскаля создается такое же давление, как в малом цилиндре.

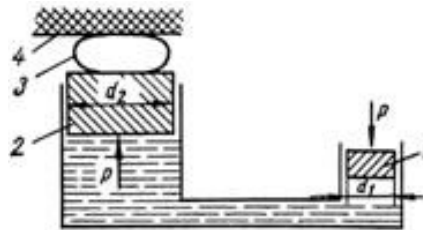


Рисунок – Схема гидравлического пресса:

1 – поршень малого цилиндра; 2 – поршень большого цилиндра; 3 – прессуемый материал; 4 – неподвижная плита

Суммарное усилие на поршень в малом цилиндре будет равно

$$P_M = \frac{\pi d_1^2 p}{4}, \quad 3.18$$

где p – давление, Па ; d_1 – диаметр малого цилиндра, м .

Соответственно суммарное усилие на поршень в большом цилиндре можно определить по формуле

$$P_B = \frac{\pi d_2^2 p}{4},$$

где d_2 – диаметр большого цилиндра, м .

Соотношение сил давления (суммарных усилий) в большом и малом цилиндрах на основании формул (4.13 и 4.14) можно записать так:

$$\frac{P_B}{P_M} = \frac{d_2^2}{d_1^2}.$$

Для отжата применяют различного рода шнековые прессы (рисунок 3..7). Сырьё из загрузочного бункера поступает в перфорированный конус, внутри которого вращается шнек. Жидкость, выделяемая из сырья под воздействием усилий, создаваемых шнеком, собирается внизу корпуса и выходит через патрубок. Величина создаваемого шнеком усилия регулируется размером зазора между перфорированным конусом и регулирующей пробкой. Чем меньше этот зазор, тем больше создаваемое усилие. Через этот зазор выходит отжатый (обезвоженный) продукт.

Шнековые прессы отличаются большим разнообразием: горизонтальные и вертикальные, с одно- и двусторонним отжатием.

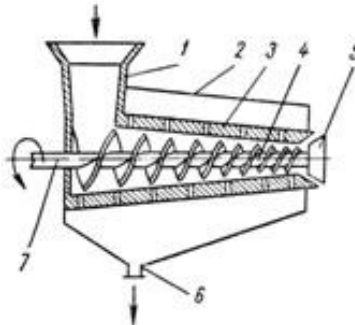


Рисунок – Схема шнекового пресса для отжата:

1 – загрузочный бункер; 2 – корпус; 3 – перфорированный корпус; 4 – конический шнек; 5 – регулирующая пробка; 6 – патрубок для выхода жидкости; 7 – приводной вал

Среди формовочных аппаратов, которые также могут выполнять отжатие, наиболее известны барабанные (рисунок 3..8). Формуемый материал (тесто) с приёмного лотка захватывается принимающим барабаном. Далее на него воздействует штампуемый барабан, на котором нанесён штамп рисунка. Отводящим барабаном материал, на который нанесён рисунок, подаётся на лоток для готового продукта.

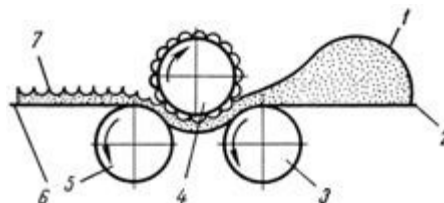


Рисунок – Схема барабанного формовочно-штамповочного аппарата:
 1 – формуемый материал; 2 – приёмный лоток; 3 – принимающий барабан; 4 – штампующий барабан; 5 – отводящий барабан; 6 – лоток для готового продукта; 7 – готовый продукт

Для приготовления различных хлебобулочных изделий широко используют ленточные формовочные аппараты (рисунок 3.9). Они называются также прокаточными. Продукт, подлежащий формованию, пропускают между движущимися навстречу друг другу лентами (ленточными транспортёрами).

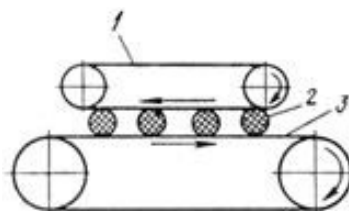


Рисунок – Ленточный формующий аппарат:
 1, 3 – ленты; 2 – продукт

Для осуществления экструзионных процессов применяют различные экструдеры. На рисунке 3.10 представлена схема червячного экструдера. Продукт, подлежащий экструзии, загружают в бункер. В зоне загрузки цилиндр имеет полости для охлаждающей воды. Из бункера продукт захватывает червяк, в левую часть которого поступает горячая вода, нагревающая продукт. Цилиндр также нагревается за счёт работы электронагревателей. Нагретый или даже расплавленный продукт червяком продавливается через фильтрующую сетку, а затем проходит через решётку и попадает в головку, из которой проходит формующий канал.

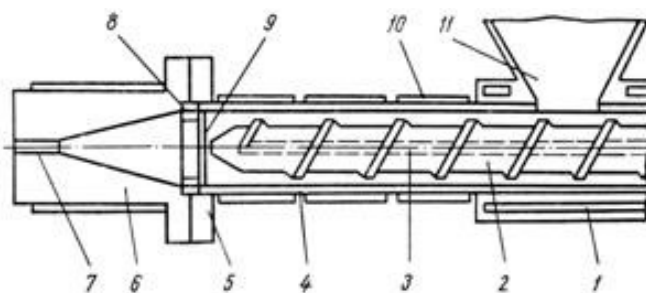


Рисунок – Схема шнекового (червячного) экструдера:
 1 – полость для охлаждающей воды; 2 – червяк; 3 – канал для подачи в червяк горячей воды; 4 – цилиндр; 5 – фланец; 6 – головка; 7 – формующий канал головки; 8 – решётка; 9 – фильтрующая сетка; 10 – электрические нагреватели; 11 – загрузочный бункер

Контрольные вопросы:

1. В чём сущность, и какие применяются виды измельчения твёрдых материалов?
2. Дайте объяснение кривой растяжения для реологического материала.
3. Представьте схематично и объясните основные способы измельчения.
4. Объясните сущность уравнения Ребиндера. Какие гипотезы дробления известны?
5. Перечислите основные требования, предъявляемые к дробилкам.
6. Приведите схемы основных аппаратов для измельчения твёрдых материалов и объясните их принцип работы. Дайте их области применения.

4. Какие основные способы резания применяются в пищевой промышленности?
8. Чем отличаются скользящее и рубящее резание?
9. Объясните принцип разрушения материала при резании.
10. Приведите основные виды режущих инструментов.
11. Охарактеризуйте основные виды прессования, применяемое в пищевой промышленности.
12. Какие факторы и как влияют на процесс прессования?
13. Как учитывается период релаксации при штамповке тестообразных материалов?
14. Приведите схемы гидравлического и шнекового прессов.
15. Приведите схемы аппаратов для формования.
16. В чём сущность экструзии? В каких аппаратах она реализуется?

Тема 5. Перемешивание и разделение неоднородных систем

Цель занятия: изучение процессов и аппаратов для перемешивания и разделения неоднородных систем

Задачами занятия является освоение:

1. Теории процессов и аппаратов для перемешивания и разделения неоднородных систем.
2. Выполнение расчетов отдельных показателей по заданию преподавателя.

Формируемые компетенции

Код	Формулировка:
ОПК-3	способен использовать знания инженерных процессов при решении профессиональных задач и эксплуатации современного технологического оборудования и приборов
ПК-5	способностью проводить проектные расчеты, обосновывать и осуществлять технологические компоновки, подбор оборудования для производственных технологических линий, основных и вспомогательных помещений, в том числе с использованием информационных технологий

Теоретическая часть

(При этой части необходимо также использовать соответствующую тему из ЭКЛ)

Неоднородные системы и способы их разделения

Неоднородные (гетерогенные) системы состоят из двух или нескольких фаз. Фазы, составляющие систему, могут быть механически отделены одна от другой. Любая неоднородная система состоит из дисперсной (внутренней) фазы и дисперсионной среды (внешней фазы), в которой распределены частицы дисперсной фазы.

В зависимости от физического состояния фаз различают:

– суспензии – это неоднородные системы, состоящие из жидкости и взвешенных в ней твёрдых частиц. В зависимости от размеров последних суспензии условно подразделяют на грубые ($> 100 \text{ мкм}$), тонкие ($0,5 - 100 \text{ мкм}$), мути ($0,1 - 0,5 \text{ мкм}$) и коллоидные растворы ($< 100 \text{ нм}$). Коллоидные растворы занимают переходную область между суспензиями и истинными растворами;

– эмульсии – это системы, состоящие из жидкости и распределённых в ней капель другой жидкости, не смешивающейся с первой. С увеличением концентрации дисперсной фазы появляется возможность обращения (инверсии) фаз. В результате слияния (коалесценции) капель дисперсная фаза становится сплошной; в ней оказываются взвешенными частицы фазы, бывшей до этого внешней;

– пены – это системы, состоящие из жидкости и распределённых в ней пузырьков газа. Эти газожидкостные системы по своим свойствам близки к эмульсиям;

– пыли и дымы – это системы, состоящие из газа и распределённых в ней частиц твёрдого вещества. Размеры твёрдых частиц пыли от 3 до 70 мкм , а у дымов $0,3 - 0,5 \text{ мкм}$.

При образовании дисперсной системы из частиц жидкости размером $0,3 - 0,5 \text{ мкм}$ возникают системы, называемые туманами. Пыли, дымы и туманы представляют собой аэродисперсные системы, или аэрозоли.

В пищевой технологии широко распространены процессы, связанные с разделением жидких и газовых неоднородных систем. Выбор метода их разделения обуславливается главным образом размерами взвешенных частиц, разностью плотностей дисперсной и сплошной фаз, а также вязкостью внешней фазы.

Применяют следующие основные методы разделения:

- 1_осаждение,
- 3_фильтрация,
- 3_центрифугирование.

Осаждение представляет собой процесс разделения, при котором взвешенные в жидкости или газе твёрдые или жидкие частицы отделяются от неё под действием сил тяжести, инерции (в том числе центробежных) или электростатических. Осаждение, происходящее под действием силы тяжести, называется отстаиванием. В основном оно применяется для предварительного, грубого разделения неоднородных систем.

Фильтрация – это процесс разделения с помощью пористой перегородки, способной пропускать жидкость или газ, но задерживать твёрдые частицы. Оно осуществляется под действием сил давления или центробежных сил и применяется для более тонкого разделения суспензий и пылей.

Центрифугирование – это процесс разделения суспензий и эмульсий в поле центробежных сил. Под действием последних осаждение сопровождается уплотнением образующегося осадка, а фильтрация – уплотнением и механической сушкой осадка.

Несмотря на общность принципов разделения жидких и газовых неоднородных систем некоторые методы их разделения, а также применяемое оборудование в ряде случаев имеют специфические особенности.

6.2 Материальный баланс процесса разделения жидких систем

Пусть разделению подлежит система, состоящая из вещества «а» (внешней фазы) и взвешенных в ней частиц «б» (дисперсная фаза).

При отсутствии потерь вещества в процессе разделения уравнения материального баланса имеют вид:

по общему количеству веществ

$$G_{см} = G_{осв} + G_{ос}, \quad 6.5$$

где $G_{см}$, $G_{осв}$, $G_{ос}$ – массовый расход, соответственно, исходной смеси, осветлённой жидкости и получаемого осадка (сгущённой дисперсной фазы), кг;

по веществу «б»

$$G_{см} X_{см} = G_{осв} X_{осв} + G_{ос} X_{ос}, \quad 6.6$$

где $X_{см}$, $X_{осв}$, $X_{ос}$ – концентрация вещества «в», соответственно, в исходной смеси, осветлённой жидкости и осадке, *масс. доли*.

Если известны расход исходной смеси и все концентрации, то решением уравнений (6.5) и (6.6) можно найти расходы $G_{осв}$ и $G_{ос}$:

$$G_{осв} = G_{см} \frac{X_{ос} - X_{см}}{X_{осв} - X_{ос}}, \quad 6.7$$

$$G_{ос} = G_{см} \frac{X_{см} - X_{осв}}{X_{ос} - X_{осв}}. \quad 6.8$$

Полученные уравнения в записанной форме применимы к осаждению и фильтрованию.

В ряде случаев при расчётах используют объёмные расходы $V \left(\frac{м^3}{с} \right)$ и концентрации, выраженные в объёмных долях, $a \left(\frac{м^3}{м^3} \right)$. Для пересчёта величины из одной размерности в другую вводят условное понятие плотности гетерогенной смеси $\rho_{см}$:

$$\rho_{см} = a_m \rho_m + (1 - a_m) \rho = \frac{1}{\frac{x_m}{\rho_m} + \frac{(1 - x_m)}{\rho}}, \quad 6.9$$

где ρ_m – плотность дисперсной фазы; ρ – плотность сплошной фазы; a_m и x_m – концентрация дисперсной фазы, выраженная соответственно в объёмных и массовых долях.

Содержание взвешенных частиц в осветлённой жидкости и в осадке выбирается в зависимости от конкретных технологических условий процесса разделения. При этом содержание вещества в осветлённой жидкости обычно ограничивается некоторым нижним пределом.

Под эффектом разделения понимают отношение массы данного компонента, выделенного из дисперсной фазы, к начальному его содержанию в смеси. Эффект разделения характеризует степень технического совершенства данного аппарата:

$$\varepsilon_p = \frac{K_{\varepsilon}}{K_H} \cdot 100, \quad 6.10$$

где K_{ε} – количество выделенного вещества (например, перешедшего в осадок); K_H – количество дисперсной фазы в неоднородной системе (количество частиц начальное).

6.3 Осаждение в гравитационном поле (отстаивание)

Скорость осаждения в гравитационном поле невелика, поэтому процесс отстаивания малоэффективен и не обеспечивает выделения из разделяемой системы частиц с высокой степенью дисперсности.

Рассмотрим процесс осаждения твёрдой частицы в вязкой неподвижной среде и выведем уравнение для определения скорости отстаивания. На рисунке 6.3 схематично представлены силы, действующие на падающую частицу шарообразной формы диаметром d .

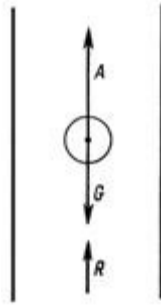


Рисунок 6.3 – Силы, действующие на частицу в вязкой среде

Для частицы с диаметром d и плотностью $\rho_ч$ **сила тяжести составляет:**

$$G = V \rho_ч g = \frac{\pi d^3}{6} \rho_ч g, \quad 6.11$$

где V – объём частицы, м^3 ; g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

Согласно закону Архимеда, подъёмная сила:

$$A = \frac{\pi d^3}{6} \rho_c g, \quad 6.12$$

где ρ_c – плотность среды, в которой находится частица, кг/м^3 .

Сила, заставляющая частицу падать:

$$G - A = \frac{\pi d^3}{6} g (\rho_ч - \rho_c) \quad 6.13$$

Среда, в которой падает частица, оказывает сопротивление R , которое будет зависеть от её вязкости и плотности ρ_c , площади сечения частицы F и её формы. Величина силы R определяется по закону Ньютона:

$$R = \frac{\xi F \rho_c v_{oc}^2}{2}, \quad 6.14$$

где ξ – коэффициент сопротивления среды, зависящий от режима движения частицы; v_{oc} – скорость осаждения частицы, м/с .

Осаждающаяся частица в начале своего движения движется ускоренно. Однако участок такого движения невелик. Так как сила $(G - A)$ становится равной силе R , то в дальнейшем частица начинает двигаться равномерно с постоянной скоростью v_{oc} . Значение v_{oc} может быть найдено из условия $(G - A) = R$. Приравняв уравнения (6.13) и (6.14) и преобразовав их (обе части умножаем на $1/v$, где v – кинематическая вязкость, $\text{м}^2/\text{с}$) получим **уравнение осаждения:**

$$\frac{1}{v^2} \frac{\pi d^3}{6} g (\rho_ч - \rho_c) = \xi \frac{\pi \cdot d^2}{4} \rho_c \frac{v_{oc}^2}{2} \frac{1}{v^2}, \quad 6.15$$

или в критериальном виде

$$\xi Re^2 = \frac{4}{3} Ar, \quad 6.16$$

где $Re = \frac{vd}{\nu}$ – критерий Рейнольдса; $Ar = \frac{gd^3(\rho_4 - \rho_c)}{\nu^2 \rho_c}$ – критерий Архимеда.

При осаждении крупных частиц (размером больше $0,1 \text{ мм}$) в относительно маловязкой среде основное сопротивление вызывается силами инерции, под действием которых происходит отрыв струй и образование турбулентных вихрей за опускающейся частицей, а силы трения играют второстепенную роль.

В условиях турбулентного режима ($Re > 500$) сопротивление среды пропорционально квадрату скорости и коэффициенту сопротивления $\xi = 0,44$. Тогда $Re^2 = 3,03 Ar$. **Отсюда:**

$$v_{oc} = \sqrt{3,03 g d^3 \frac{(\rho_4 - \rho_c)}{\rho_c}} \quad 6.17$$

При ламинарном режиме ($Re < 2$) сопротивление среды пропорционально первой степени и $\xi = 24/Re$. Подставляя это значение ξ в уравнение (2.79), получим $Re = 1/18 Ar$. **Тогда:**

$$v_{oc} = \frac{1}{18} \cdot \frac{g d^2 (\rho_4 - \rho_c)}{\nu \rho_c} \quad 6.18$$

Выражение (6.18) носит название формулы Стокса, показывает скорость осаждения частиц в поле сил тяжести.

Приближённое значение v_{oc} (для всех режимов движения частицы) можно найти по **уравнению Тодеса:**

$$Re = \frac{Ar}{(18 + 0,61 \sqrt{Ar})} \quad 6.19$$

В суспензии и эмульсии обычно имеются частицы разных размеров. Расчёт необходимо вести для частиц меньшего размера, т. к. если создать условия для осаждения мелких частиц, то для крупных они будут заведомо достаточны. Из уравнения (6.18) видно, что скорость осаждения возрастает с увеличением диаметра частиц, разности плотностей осаждаемых частиц и среды, и понижением её вязкости. Поэтому для более эффективного проведения процесса отстаивания необходимо воздействовать теми или иными способами именно на эти параметры. Так, уменьшая вязкость и плотность среду путём повышения её температуры или разбавления маловязким растворителем, можно увеличить скорость осаждения. Соответствующее воздействие на размеры осаждаемых частиц с целью их увеличения (добавление коагулянтов, электрического поля высокого напряжения) приводят к значительному повышению скорости осаждения.

Для определения расчётной скорости движения v_p необходимо учесть влияние формы частиц и объёмной концентрации суспензии путём введения коэффициентов φ и λ . Тогда расчётная скорость:

$$v_p = \varphi \lambda v_{oc}, \quad 6.20$$

$$\text{где } \varphi = 0,43 - 0,77; \quad \lambda = \frac{(1 - C_v)^2}{1 + 2,5 C_v + 7,35 C_v^2}; \quad C_v - \text{объёмная концентрация (в долях)}.$$

1. Какие вы знаете неоднородные (гетерогенные) системы?
2. Назовите методы разделения неоднородных систем.
3. Приведите уравнения материального баланса процесса разделения.

4. Какие уравнения описывают процесс осаждения при ламинарном и турбулентном режимах?
5. Как определяется расчётная скорость осаждения?

Механическое перемешивание

По скорости вращения мешалки для жидкостей условно подразделяют на две группы:

- 1_тихоходные (якорные, рамные и другие, у которых окружная скорость концов лопастей примерно 1 м/с) и
- 2_быстроходные (пропеллерные, турбинные и другие, у которых окружная скорость порядка 10 м/с).

Иногда мешалки классифицируют по направлению основного потока жидкости (тангенциальное, радиальное, аксиальное), но этот вид классификации мешалок не получил широкого распространения ввиду трудности в ряде случаев определения распределения скоростей движения жидкости в аппарате.

Обычно аппарат для перемешивания представляет собой вертикальный сосуд с мешалкой, ось вращения которой совпадает с осью аппарата (рисунок 5.2). В зависимости от условий проведения того или иного процесса объём аппарата с мешалкой может составлять от нескольких долей до нескольких тысяч кубических метров. Основными узлами таких аппаратов являются корпус, привод и вал с мешалкой.

Корпус аппарата обычно состоит из вертикальной цилиндрической обечайки 5, крышки 2, на которой установлен привод мешалки 7, и днища 9. Аппараты, рабочее давление в которых отличается от атмосферного, имеют, как правило, эллиптические днища и крышки, причём в аппаратах большого диаметра крышки и днища выполняют неразъёмными (цельносваренными с корпусом), а для внутреннего осмотра и чистки таких аппаратов на крышке устанавливают люки достаточно большого диаметра. На крышках размещают также патрубки 4 и 11 для подвода и отвода веществ, подачи сжатого газа, установки контрольно-измерительных приборов и т. п. Для подвода и отвода теплоты корпус аппарата снабжают рубашкой 4. Приводом перемешивающего устройства обычно служит электродвигатель, соединённый с валом мешалки прямой или понижающей передачей. Для уменьшения частоты вращения вала мешалки по сравнению с валом электродвигателя применяют различные по устройству редукторы.

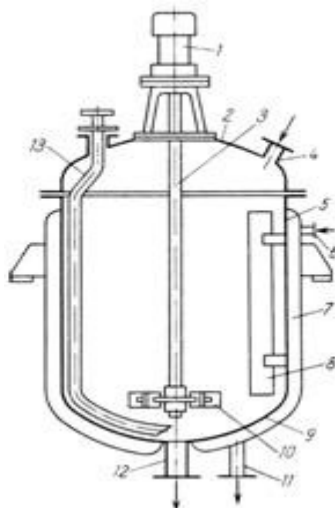


Рисунок 5.2 – Аппарат с мешалкой:

1 – двигатель с приводом; 2 – крышка; 3 – вал мешалки; 4 – штуцер для подачи сжатого воздуха; 5 – корпус; 6, 11 – штуцеры входа и выхода теплоносителя; 7 – рубашка; 8 – отражательная перегородка; 9 – днище; 10 – мешалка; 12 – штуцер слива продукта; 13 – труба переливная

Конструктивным элементом, непосредственно предназначенным для приведения жидкости в движение, является мешалка. Как показывает практика, большинство задач перемешивания может быть успешно решено путём использования ограниченного числа конструкций мешалок. При этом существуют наиболее характерные области применения и диапазоны геометрических соотношений отдельных типов мешалок. Например, для перемешивания высоковязких сред при ламинарном режиме используют ленточные, скребковые и шнековые мешалки (рисунок 5.3, а, б, в). Скребковые мешалки применяют преимущественно для интенсификации теплообмена; скребки крепят с помощью пружин, тем самым обеспечивая плотное прилегание их к стенке аппарата.

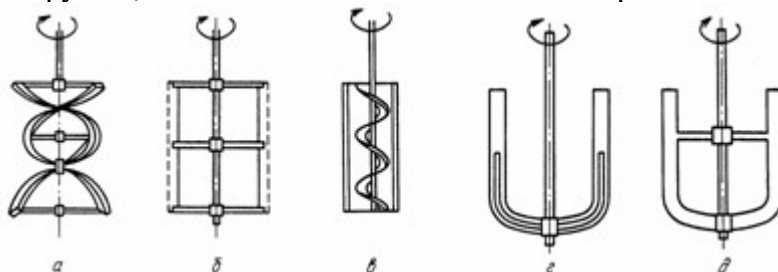


Рисунок 5.3 – Мешалки для перемешивания высоковязких сред (а – в) и средней вязкости (г, д):

а – ленточная; б – скребковая; в – шнековая с направляющей трубой; г – якорная; д – рамная

Для перемешивания жидкостей сравнительно невысокой вязкости (обычно при подводе теплоты, т. е. в аппаратах с рубашкой) применяют тихоходные мешалки – якорные и рамные (рисунок 5.3, г, д). Отношение D_a/d_m у этих мешалок невелико ($1,05 - 1,25$), поэтому их часто используют при перемешивании суспензий, частицы которых характеризуются склонностью к налипанию на стенки.

Быстроходные лопастные, турбинные, пропеллерные мешалки (рисунок 5.4) обычно имеют отношение $D_a/d_m \geq 1,5$. Они различаются способностью создавать осевое циркуляционное течение. В аппаратах без внутренних устройств эти мешалки обеспечивают насосный

эффект, вдвое превышающий насосный эффект обычных мешалок (например, показанных на рисунке 5.3, г, д).

Следует отметить, что целесообразность использования мешалок тех или иных конструкций часто определяется особенностями технологии их изготовления. Например, при гуммировании или эмалировании мешалок наличие острых углов и кромок препятствует образованию надёжного покрытия. Для гуммирования удобны лопастные мешалки, а для эмалирования – мешалки из сплюснутых труб. За последние годы из новых конструкций мешалок в практику перемешивания прочно вошли только эмалированные мешалки из сплошных труб и фрезерные (рисунок 5.4, е). Фрезерная мешалка представляет собой диск с лопастями в форме зубцов. Она обеспечивает высокую разность скоростей лопастей мешалки и потока обтекающей их жидкости.

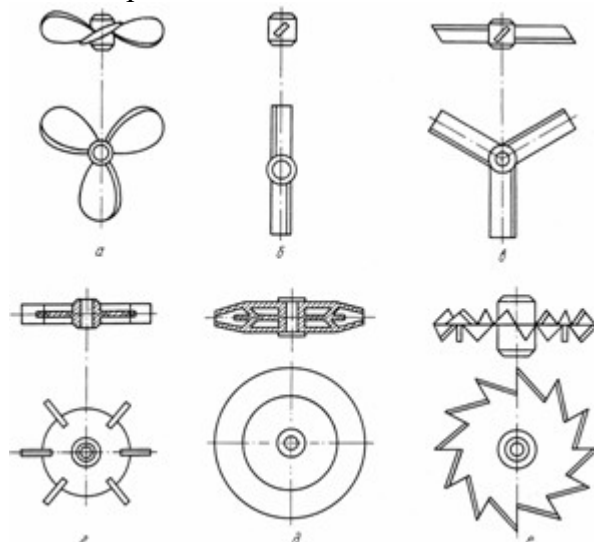


Рисунок 5.4 – Быстроходные мешалки:

а – пропеллерная; б – двухлопастная; в – трёхлопастная; г – турбинная открытая; д – турбинная закрытая; е – фрезерная

Фрезерные мешалки применяют в основном для приготовления тонко дисперсных суспензий.

Интенсивность перемешивания в значительной мере зависит от наличия тех или иных внутренних неподвижных устройств. По функциональному назначению эти устройства можно подразделить на три группы:

- 1) для организации потока;
- 2) теплообменные;
- 3) технологические трубопроводы (для подачи жидких и газообразных компонентов) и трубопроводы для размещения контрольно-измерительных приборов.

Для организации потока наиболее часто используют отражательные перегородки, основное назначение которых – уменьшение окружной составляющей скорости при соответствующем увеличении осевой и радиальной составляющих. Для увеличения в аппарате насосного эффекта служат направляющие трубы (диффузоры). Их применяют как при ламинарном, так и при турбулентном режиме перемешивания, причём в первом случае в сочетании со шнековыми, а во втором – с пропеллерными (винтовыми) мешалками.

В качестве внутренних теплообменных устройств в аппаратах объёмом менее 5 м^3 змеевик обычно устанавливают соосно с валом перемешивающего устройства, а в аппаратах большого объёма может быть использовано несколько змеевиков, расположенных по периферии. Концентрическое расположение двух и более змеевиков нежелательно ввиду ухудшения перемешивания и теплообмена в межтрубном пространстве.

5.4 Другие способы перемешивания

Пневматическое перемешивание основано на том, что через жидкостную систему или её смесь с другими компонентами пропускают (барботируют) воздух или какой-либо газ. Вязкие жидкости (приблизительно до $200 \text{ Па} \cdot \text{с}$) перемешивать данным способом весьма затруднительно. Нельзя также применять перемешивание воздухом жидкостных систем, содержащих жир или другие вещества, вступающие в реакцию с кислородом. Перемешивание легколетучих жидкостей пневматическим путём не рекомендуется, т. к. они при этом удаляются с перемешивающим газом. Перемешивание за счёт барботирования воздуха эффективно при замачивании или мойке зерна, круп. Иногда перемешивание производится паром, тогда перемешиваемая жидкость одновременно подогревается.

Принцип перемешивания заключается в следующем. Газ или пар поступает через отверстия сопла (барботёра). При этом струи газа (пара) распадаются на пузыри, поднимающиеся в массе жидкости. В этом случае перемешивание происходит за счёт того, что всплывающие пузыри увлекают часть жидкости, а также из-за возникновения потока небарботируемой жидкости, противоположного направлению движения пузырей.

Интенсивность перемешивания определяется количеством газа (пара), пропускаемого в единицу времени через единицу свободной поверхности жидкости в смесителе.

Расход энергии на пневматическое перемешивание зависит от количества газа и давления, которое газ преодолевает. Давление, создаваемое воздуходувкой, складывается из двух величин:

– давления P , необходимого для преодоления давления столба жидкости в резервуаре;

– давления P_m , теряемого при прохождении газа по системе трубопроводов (определяется по формулам гидравлики).

Мощность воздуходувки:

$$N = V \frac{(p + p_m)}{10,2\eta}, \quad 5.10$$

где V – расход подаваемого воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$; η – КПД воздуходувки.

Пневматическое перемешивание имеет ограниченное применение. Оно используется тогда, когда допускается взаимодействие перемешиваемой жидкости с газом (паром).

Циркуляционное перемешивание основано на том, что жидкостную систему многократно пропускают через насос по замкнутому циклу «насос-ёмкость». В качестве насосов могут быть использованы центробежные и струйные насосы. Этот вид перемешивания применяют в тех случаях, когда необходимо получить устойчивых эмульсий или суспензий, он широко используется для сатурации жидкости с целью получения газированных напитков.

Интенсивность циркуляционного перемешивания зависит от кратности циркуляции, т. е. отношения подачи циркуляционного насоса в единицу времени к объёму жидкости в аппарате.

Перемешивание в потоке путём создания искусственной турбулизации применяют, когда одна жидкость хорошо растворяется в другой. При этом необходимо поддерживать в камере смешения большие скорости и жидкости не должны быть вязкими. В этих смесителях создаётся тесное соприкосновение потоков двух и большего числа жидкостей.

В смесителе (рисунки 5.5, а) перемешиваемые жидкости движутся в поступательном потоке, сечение которого остаётся постоянным. Перемешивание достигается за счёт многократного изменения направления движения, приводящего к возникновению интенсивной турбулизации потока.

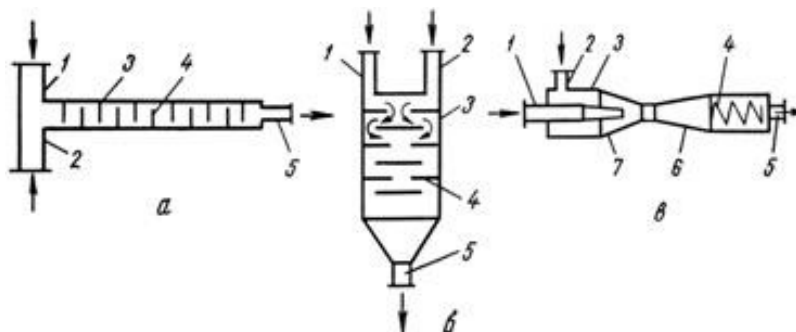


Рисунок 5.5 – Схемы устройств для перемешивания в потоке:
а, б – смесители с перегородками; в – струйный смеситель: 1, 2 – патрубки для входа компонентов; 3 – камера смешения; 4 – перегородки-турбулизаторы; 5 – выходной патрубок; 6 – диффузор; 7 – конфузор

В смесителе (рисунок 5.5, б) перемешивание достигается за счёт того, что жидкости движутся то в радиально-расширяющемся потоке, то в радиально-сходящемся. При этом сечение потока изменяется. Над перегородками, не имеющими отверстий, жидкости движутся от центра к периферии камеры смешения. Сечение потока в этом случае увеличивается. При движении жидкостей над перегородками с отверстиями они перемещаются от периферии к центру. Сечение потока здесь уменьшается. Площадь сечения потока в радиально-сходящихся и радиально-расходящихся потоках определяют по формуле:

$$S = 2\pi R h, \quad 5.11$$

где R – текущий радиус перегородки в том месте, где определяется сечение, м; h – расстояние между перегородками, м.

Радиально-сходящиеся и радиально-расходящиеся потоки характеризуются неустойчивостью. Турбулентный режим в них начинается при незначительных величинах критерия Рейнольдса. Критическая величина критерия $Re_{кр}$ зависит от величины расстояния между перегородками. Так, при $h = 0,5 \text{ мм}$ $Re_{кр} = 700$, при $h = 5 \text{ мм}$ значение $Re_{кр}$ падает до 100.

Струйный смеситель (рисунок 5.5, в) применяется для перемешивания жидкости с жидкостью и жидкости с газом. Для интенсивного перемешивания компонентов в качестве перегородок (турбулизаторов) в нём используется неподвижный шнек.

5.5 Перемешивание сыпучих материалов

Для смешивания сыпучих материалов в пищевых производствах используют как смесители, работающие в других отраслях промышленности, так и специально сконструированные смесители для смешивания материалов, различающихся гранулометрическим составом, плотностью, прочностью, физическим состоянием и другими физическими свойствами.

Как правило, смесители классифицируют по принципу действия, скоростным характеристикам и конструктивным признакам.

По принципу действия все смесители могут быть разделены на смесители периодического и непрерывного действия.

Смесители периодического действия можно разделить на барабанные, ленточные, бегунковые, центробежные, с вращающимся ротором, червячно-лопастные, плунжерные, пневмосмесители и смесители с псевдоожиженным слоем;

смесители непрерывного действия – на барабанные, червячно-лопастные, роторные и др.

По скоростным характеристикам смесители делятся на тихоходные ($Fr < 30$) и быстроходные.

Рассмотрим основные типы смесителей для сыпучих материалов (рисунок 5.6). Лопастной смеситель (рисунок 5.6, 1) имеет две Z -образные лопасти a и b , вращающиеся навстречу друг другу. Материал, поступающий в смеситель, подвергается энергичному воздействию лопастей. Такого типа смесители применяют для смешивания как сыпучих, так и пластичных материалов (мясного фарша, крутого теста). Шнековый смеситель (рисунок 5.6, 2) осуществляет перемешивание одновременно с транспортированием материала.

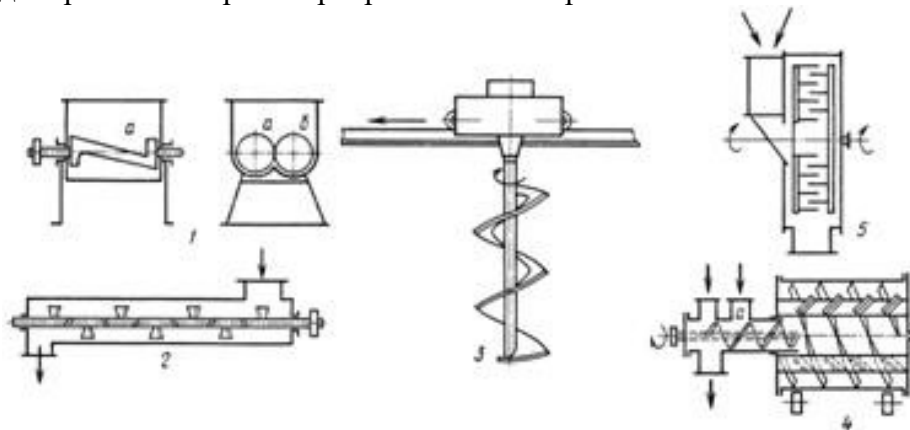


Рисунок 5.6 – Основные типы смесителей для сыпучих тел:
1 – лопастные; 2, 3 – шнековые; 4 – барабанные; 5 – ударные

На пищевых производствах широкое распространение получили шнековые смесители с подвижной осью – ворошители. Ворошители (рисунок 5.6, 3) применяются в производстве солода. Они имеют ряд вертикальных шнеков, укрепленных на подвижной раме. Рама вместе с вращающимися шнеками перемещается в перемешиваемой массе.

В барабанных смесителях (рисунок 5.6, 4) перемешивание осуществляется при вращении барабана, снабженного внутренними лопатками, обеспечивающими пересыпание материала. Материал подается в барабан шнеком a , который служит и для выгрузки смешанной массы.

В смесителях ударного типа (рисунок 5.6, 5) интенсивное перемешивание достигается вследствие ударов билами о смешиваемые частицы; бил насажен на диски, быстро вращающиеся в противоположных направлениях.

5.6 Перемешивание пластичных материалов

Перемешивание пластичных масс подразумевает (особенно в хлебопекарном, макаронном и кондитерском производствах) не только образование однородной смеси из ряда ингредиентов (воды, муки, дрожжей, сахара, соли, масла и др.), но также и разминание массы, насыщение её воздухом и придания им определённых структурно-механических свойств.

Смешивание условно состоит из трёх элементарных процессов:

- конвективное смешивание – это перемещение групп частиц из одного объёма смеси в другой внедрением и скольжением слоёв;
- диффузионное смешивание – это постепенное перемещение частиц различных компонентов через вновь образованные границы их раздела;
- сегрегация – это сосредоточение близких по форме, массе и размерам частиц в разных точках смесителя.

Первые два процесса способствуют равномерному распределению частиц в смеси, последний – препятствует этому. Поэтому целесообразно заканчивать процесс смешивания в конце второго интервала смешивания.

Замес теста включает три стадии:

– смешивание сухих и жидких компонентов теста – должно производиться как можно быстрее;

– замес – сопровождается диффузией влаги мучнистых частиц, набуханием белков. Эта стадия требует значительных энергозатрат вследствие возрастания усилия сдвига теста и может протекать при невысоких скоростях перемешивания;

– пластификация – сопровождается структурными изменениями крахмальных зёрен. Требуется усиленного механического воздействия, т. к. происходит разрушение молекул клейковины, а также выравнивание структуры теста и её измельчение.

Процесс перемешивания проводится в смесителях периодического и непрерывного действия, оборудованных специальными перемешивающими устройствами – рамными. Шнековыми и ленточными мешалками. Смесители могут иметь месильное устройство с вертикальной или горизонтальной осью.

Для обработки эластично-упругих масс (пшеничное тесто) в ряде случаев применяют смесители с двумя месильными устройствами, вращающимися навстречу друг другу с различными скоростями.

Лопастные смесительные аппараты периодического действия для смешивания пластичных масс состоят из дежи (неподвижной или вращающейся вокруг вертикальной оси) и перемешивающего устройства. Некоторые смесители имеют месильный орган с горизонтальной осью, другие с вертикальной осью. Имеются смесители, месильный орган которых производит сложное пространственное движение.

Машины непрерывного действия представляют собой одинарные или парные лопастные шнеки. Одновременно они осуществляют и транспортировку массы.

Для расчёта мощности, потребляемой шнековой мешалкой, может быть использовано

уравнение $Eu_M = 71 / Re_M$ или $N = Ad_M n^2 \mu$. Коэффициент A определяется как функция типа геометрических соотношений перемешивающего устройства.

Для смешивания мало- и высоковязких кондитерских смесей (вафельное тесто, вафельная начинка, бисквитное тесто, песочное тесто и т. д.), а также перемешивания кондитерских масс с сыпучими компонентами (кексовое тесто с изюмом, белково-сбивная масса с орехами) применяются смесители корытообразной форм с расположенными в них двумя спиральными рабочими органами, вращающимися в разные стороны. Высокая интенсивность перемешивания достигается за счёт проведения процесса в тонком слое.

В общем случае выбор типа машин определяется характером обрабатываемого материала. Пластичные массы (ржаное тесто) могут обрабатываться в мешалках с вращающимся месильным органом. Для эластично-упругих масс (пшеничное тесто из муки высших сортов) требуется применение смесителей со сложной траекторией движения. Иногда для обработки такого теста применяют аппараты с двумя месильными органами, вращающимися вокруг горизонтальной оси навстречу один другому с различными скоростями.

1. С какой целью проводят перемешивание в пищевой технологии?
2. Какие показатели характеризуют процесс перемешивания в жидких средах?
3. Какие существуют способы перемешивания в жидких средах?
4. Какие конструкции механических мешалок применяются в пищевой промышленности, и от чего зависит выбор мешалки?
5. Опишите устройство аппарата с мешалкой. Для чего служат отражательные устройства?
6. От каких параметров зависит мощность, потребляемая мешалкой?
4. Почему в критериальное уравнение, описывающее процесс перемешивания, входят модифицированные критерии гидродинамического подобия?

8. Что такое критерий мощности и как определяется мощность, потребляемая мешалкой?
9. Объясните устройство и работу основных типов смесителей для сыпучих материалов.
10. Из каких элементарных процессов состоит смешивание пластичных материалов?
11. Какие типы месильных устройств применяются для перемешивания пластичных масс?

Тема 6. Псевдооживление, осаждение и сепарирование в поле центробежных сил, мембранные методы разделения жидких систем

Цель занятия: изучение процессов и аппаратов для перемешивания и разделения неоднородных систем

Задачами занятия является освоение:

1. Теории процессов и аппаратов для перемешивания и разделения неоднородных систем.
2. Выполнение расчетов отдельных показателей по заданию преподавателя.

Формируемые компетенции

Код	Формулировка:
ОПК-3	способен использовать знания инженерных процессов при решении профессиональных задач и эксплуатации современного технологического оборудования и приборов
ПК-5	способностью проводить проектные расчеты, обосновывать и осуществлять технологические компоновки, подбор оборудования для производственных технологических линий, основных и вспомогательных помещений, в том числе с использованием информационных технологий

Теоретическая часть

(При этой части необходимо также использовать соответствующую тему из ЭКЛ)

Псевдооживление

Перевод зернистого слоя в псевдооживленное (кипящее) состояние позволяет интенсифицировать многие процессы (адсорбции, сушки, теплообмена и т. п.), а также создать условия для перемещения и смешивания сыпучих материалов. При этом размер частиц должен быть небольшим, что приводит к увеличению поверхности их контакта с жидкостью или газом при сравнительно невысоком гидравлическом сопротивлении. Скорость процессов тепло- и массообмена повышается ещё и потому, что в условиях псевдооживления практически вся поверхность всех частиц омывается потоком, причём при значительных скоростях.

При продувании через зернистый слой газа или пропускании воздуха возможны три состояния (рисунок 7.1).

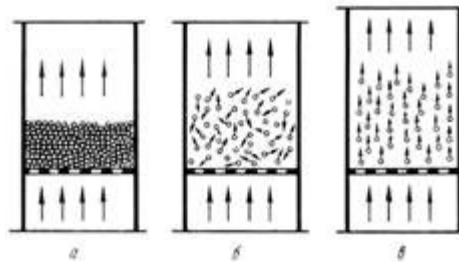


Рисунок 7.1 – Состояния зернистого слоя:
а – неподвижный слой; б – кипящий слой; в – унос частиц

При небольших скоростях движения газа неподвижность слоя сохраняется, высота его неизменна, свойства постоянны.

При скоростях выше первой критической скорости (скорости псевдооживления) толщина слоя увеличивается, зёрна начинают хаотически двигаться. В это время слой приобретает текучесть, визуально он как бы закипает, на его свободной поверхности появляются волны и всплески, наблюдается проскакивание газовых пузырей. В этих условиях слой ещё имеет довольно чёткую верхнюю границу раздела с потоком.

При дальнейшем увеличении скорости потока высота и порозность слоя растёт при практически постоянном гидравлическом сопротивлении. При этом сохраняется выраженная граница раздела между псевдооживленным слоем и потоком. При превышении второй критической скорости (скорости уноса или скорости витания) происходит разрушение псевдооживленного слоя и вынос частиц потоком. Это явление массового уноса частиц называют гидро- или пневмотранспортом и используют в технике перемещения сыпучих материалов.

Таким образом, рабочая скорость v_o в псевдооживленном слое должна находиться в пределах $v_{1кр} < v_o < v_{2кр}$. Отношение рабочей скорости к скорости начала псевдооживления называют числом псевдооживления K_n . Оно характеризует интенсивность перемешивания частиц. Для каждого конкретного случая определяется оптимальное значение K_n , однако интенсивное перемешивание частиц обычно достигается уже при $K_n = 2$.

Следует отметить также, что структура псевдооживленного слоя (рисунок 7.2) в определённой степени зависит от того, каким потоком – жидкостью или газом – достигнуто состояние зернистого материала.

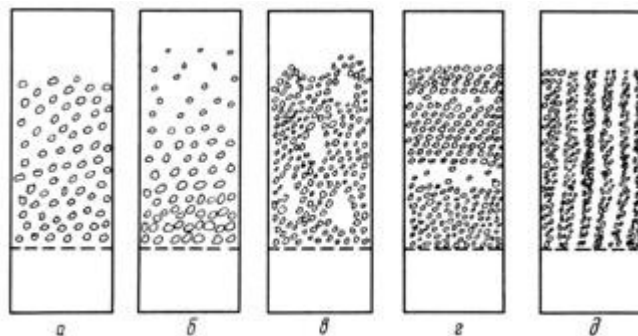


Рисунок 7.2 – Схема режимов работы аппаратов с псевдооживленным слоем твердой фазы:
а – однородным; б – сегрегированным неоднородным; в – с барботажем пузырей;
г – поршневой; д – с каналообразованием

Однородное псевдооживление наблюдается при псевдооживлении капельной жидкостью. При этом увеличение скорости выше первой критической скорости приводит к равномерному увеличению высоты слоя без существенных колебаний границы слоя.

При псевдоожигении газом обычно происходит неоднородное псевдоожигение, особенно характерное для больших чисел псевдоожигения. При этом часть газа движется не сплошным потоком, но и в виде пузырей, иногда достаточно больших. Эти пузыри разрушаются при выходе из слоя, приводя к резким колебаниям его высоты. С увеличением скорости газа неоднородность слоя возрастает, размеры пузырей увеличиваются, и иногда они могут достигать по размеру диаметра аппарата; при этом возможно поршневое движение частиц, находящихся над пузырьём. При выходе пузырей из псевдоожигенного слоя часть слоя подбрасывается вверх, что приводит к значительному уносу частиц газовым потоком. При поршневом псевдоожигении ухудшается контакт между частицами и газом, и соответственно ухудшаются условия проведения того или иного процесса.

Если в псевдоожигенное состояние переводят слой мелкозернистого слипающегося материала, то при скорости немного выше первой критической скорости, возможно нарушение однородности слоя вследствие образования сквозных каналов. В этом случае значительное количество газа проходит через такие каналы, т. е. происходит проскок или байпасирование газового потока без полного контакта со всеми частицами слоя. При увеличении скорости газа эти каналы часто полностью исчезают или сохраняются лишь в слое непосредственно над опорно-распределительной решёткой.

Скорость псевдоожигения наиболее надёжно определяется экспериментально. Расчётным путём она находится из функциональной зависимости $v_{1kp} = f(Re; Ar)$, которая должна быть раскрыта для каждого вида зернистого материала.

Применительно к псевдоожигению критерий Рейнольдса

$$Re_{no} = \frac{v_{1kp} d}{\nu}, \quad 7.1$$

где d – определяющий диаметр частицы, м; ν – кинематическая вязкость газа или жидкости, $\text{м}^2/\text{с}$.

Критерий Архимеда имеет традиционный вид

$$Ar = \frac{gl^3(\rho_m - \rho_g)}{\nu^2 \rho_g}, \quad 7.2$$

где l – линейный размер частицы, м; ρ_m – плотность материала, $\text{кг}/\text{м}^3$; ρ_g – плотность газа или жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Определение v_{1kp} осуществляется на основе критериальных уравнений, которые получены эмпирическим путём для каждого конкретного случая. Так, для частиц, имеющих форму, близкую к шару

$$Re_{no} = \frac{Ar}{1400 + 5,22\sqrt{Ar}}. \quad 7.3$$

Аналогично по экспериментально полученным уравнениям определяют скорость витания

$$Re_{vit} = \frac{Ar}{18 + 0,575\sqrt{Ar}}, \quad 7.4$$

где Re_{vit} – критерий Рейнольдса, определяемый для второй критической скорости.

Контрольные вопросы:

1. Какое состояние слоя зернистого материала называется псевдоожигенным? Как оно достигается?
2. Охарактеризуйте различные виды структур псевдоожигенного слоя.
3. Как определяется скорость псевдоожигения?

Осаждение и сепарирование в поле центробежных сил

Циклонный процесс и осадительное центрифугирование. Фактор разделения, его физический смысл. Закономерности центрифугирования. Классификация отстойных центрифуг. Отстойная центрифуга периодического действия с ручной выгрузкой осадка. Автоматическая отстойная центрифуга. Непрерывнодействующая отстойная горизонтальная центрифуга со шнековой выгрузкой осадка. Тарельчатые сепараторы, их классы. Процесс в сепараторах осветлителей и разделителей. Трубчатая сверхцентрифуга периодического действия для осветления жидкостей. Устройство и принцип действия циклонов. Мультициклоны. Гидроциклоны и мультигидроциклоны.

8.1 Закономерности осаждения. Фактор разделения

Проводя процесс разделения гетерогенных систем под действием центробежных сил, можно существенно интенсифицировать его по сравнению с отстаиванием благодаря увеличению движущей силы.

Для создания поля центробежных сил обычно используют один из двух способов: либо обеспечивают вращательное движение потока в неподвижном аппарате, либо поток направляют во вращающийся аппарат, где он начинает вращаться вместе с аппаратом. В первом случае процесс проводят в циклонах, во втором – в отстойных (осадительных) центрифугах.

Соответственно в первом случае разделение называют циклонным процессом, во втором – осадительным (отстойным) центрифугированием.

Для оценки эффективности осаждения под действием центробежной силы сравним его с осаждением под действием сил тяжести.

Центробежная сила, действующая на частицу, составляет

$$G_{ц} = \frac{m v_r^2}{r}, \quad 8.1$$

где m – масса частицы, кг; v_r – окружная скорость вращения частицы вместе с потоком на радиусе r , м/с; r – радиус вращения частицы, м.

Сила тяжести

$$G_m = mg. \quad 8.2$$

Разделив (8.1) на (8.2), получим

$$G_{ц}/G_m = v_r^2/gr. \quad 8.3$$

Таким образом, центробежная сила, действующая на частицу, может быть больше силы

тяжести во столько раз, во сколько ускорение центробежной силы $\frac{v_r^2}{r}$ больше ускорения свободного падения g . Отношение этих ускорений называют фактором разделения и обозначают K_p :

$$K_p = \frac{v_r^2}{gr}. \quad 8.4$$

Учитывая, что окружная скорость $v_r = 2\pi r n$, фактор разделения можно выразить также через n – частоту вращения частицы с потоком:

$$K_p = \frac{(2\pi n)^2}{gr} = \frac{4\pi^2 r^2 n^2}{gr} = \frac{4\pi^2 n^2 r}{g} \quad 8.5$$

Значение K_p для циклонов имеет порядок сотен, а для центрифуг – около 3000; таким образом, движущая сила процесса осаждения в циклонах и центрифугах на $2-3$ порядка больше, чем в отстойниках. Благодаря этому производительность циклонов и центрифуг выше производительности отстойников, и в них можно эффективно отделять мелкие частицы: в центрифугах размером порядка 1 мкм , в циклонах – порядка 10 мкм .

Фактор разделения является важной характеристикой центрифуг, т. к. их разделяющая способность при прочих равных условиях зависит от его величины. Он показывает во сколько раз скорость осаждения частиц твёрдой фазы при центрифугировании больше скорости подобного процесса в отстойниках.

Анализ выражения (8.5) показывает, что увеличение оборотов ротора значительно больше влияет на величину фактора разделения, чем увеличение радиуса. Все центрифуги по величине фактора разделения подразделяются на две группы:

1. Нормальные центрифуги ($K_p < 3000$).
2. Сверхцентрифуги ($K_p > 3000$).

Рассмотрим отстойную центрифугу с одним ходом жидкости через барабан (рисунок 8.1).

Если жидкость в кольцевом зазоре движется вверх со скоростью v_l , то твёрдые частицы одновременно перемещаются и в радиальном направлении под действием центробежной силы C со скоростью v_r . Поскольку величина центробежной силы увеличивается, по мере удаления от оси вращения, скорость v_r является величиной переменной и зависит от положения частицы в кольцевом пространстве барабана. Каждая частица должна успеть достигнуть стенки барабана прежде, чем она будет вынесена из него потоком жидкости. Следовательно, скорость протекания жидкости через барабан v_l должна быть такой, чтобы самые мелкие частицы успели пройти через всю толщу жидкости $R - R_0 = S$.

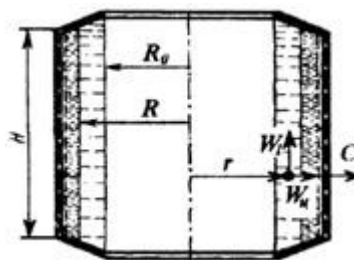


Рисунок 8.1 – Схема цилиндрического ротора центрифуги

Рассмотрим движение частицы, диаметр которой лежит в пределах применения закона Стокса (ламинарный режим). Такая частица тонет в жидкости под действием силы тяжести со скоростью:

$$v_{oc} = \frac{1}{18} \frac{gd^2(\rho_{ч} - \rho_{ж})}{\nu \rho_{ж}} \quad 8.6$$

Центробежная сила больше силы тяжести в $\frac{\omega_r^2 r}{g}$ раз, где r – текущий радиус. **Значит, во столько раз больше будет скорость передвижения частицы под её действием:**

$$v_y = \frac{1}{18} \frac{gd^2(\rho_y - \rho_{ж})}{\nu \rho_{ж}} \frac{\omega_r^2 r}{g} \quad 8.7$$

Подставим в выражение (8.7) вместо скорости первую производную от пути по времени:

$$\frac{dS}{d\tau} = \frac{d^2}{18\nu} \frac{(\rho_y - \rho_{ж})}{\rho_{ж}} \omega_r^2 r \quad 8.8$$

Разделяя переменные и интегрируя в пределах от R_0 до R , получим время осаждения частицы на стенку ротора:

$$\tau = \frac{18\nu\rho_{ж}}{(\rho_y - \rho_{ж})d^2\omega_r^2} 2,3 \lg \frac{R}{R_0}, c \quad 8.9$$

Это время τ должно быть меньше времени прохождения частицы через барабан τ_l или в пределе равно ему $\tau \leq \tau_l$, где:

$$\tau_l = \frac{H}{v_l}, c \quad 8.10$$

Отсюда находим максимально допустимую скорость прохождения частицы через барабан:

$$v_l = \frac{H}{\tau_l}, m/c \quad 8.11$$

Тогда пропускная способность центрифуги будет:

$$V = \pi(R^2 - R_0^2) v_l 3600, m^3/c \quad 8.12$$

Для турбулентного и переходного режимов:

$$v_0 = \sqrt{3,03 \frac{gd^2(\rho_y - \rho_{ж})}{\rho_{ж}} \frac{\omega_r^2 r}{g}} \quad 8.13$$

Эффективность работы центрифуг и сепараторов связана с режимом течения жидкости в барабане. Течение жидкости должно быть ламинарным. При турбулентном движении частицы под действием пульсаций жидкости приобретают хаотическое движение и их перемещение к центру или периферии барабана затрудняется.

Выражения (8.9), (8.12) и (8.13) являются приближёнными, приводят к большим ошибкам, т. к. не учитывают уменьшения сечения барабана и увеличения скорости жидкости вследствие отложения осадка, в результате чего частица проходит путь, меньший расчётного.

В циклонах и центрифугах происходит вихреобразование, нарушающее нормальное осаждение частиц. Кроме того, осевшие частицы могут вновь вовлекаться в поток. В центрифугах возможно отставание вращения суспензии от вращения ротора, что снижает фактор разделения.

Ещё более усложняется расчёт реальных систем вследствие их полидисперсности, неша-рообразной форм частиц, стеснённого осаждения.

Поэтому при инженерных расчётах циклонов и центрифуг довольно часто приходится основываться на экспериментальных данных.

8.2 Отстойные (осветлительные) центрифуги

По режиму работы отстойные центрифуги подразделяются на три группы:

– периодического действия; в эти центрифуги периодически подводится суспензия и периодически из них отводятся продукт разделение; такие машин в настоящее время применяются редко;

– полунепрерывного действия; неоднородная смесь подаётся непрерывно в течение некоторого времени, декантат (фугат) также в течение этого времени отводится непрерывно, а осадок выгружается периодически; к этим центрифугам относятся обычные отстойные машин и сверхцентрифуги для осветления мутных систем;

– непрерывного действия; подача разделяемой смеси и отвод продуктов разделения осуществляется непрерывно; по этому принципу работают сепаратор и сверхцентрифуги для разделения эмульсий, а также шнековые осадительные центрифуги.

В общем случае разделение суспензий в отстойных центрифугах складывается из стадий осаждения твёрдых частиц на стенках ротора и уплотнения образовавшегося осадка. Первая из этих стадий протекает по законам гидродинамики, вторая – по закономерностям механики грунтов.

Отстойная центрифуга периодического действия с ручной выгрузкой осадка (рисунок 8.2) состоит из барабана, насаженного на вращающийся вал и помещённого в корпус. Под действием центробежной силы, возникающей при вращении барабана, твёрдые частицы осаждаются в виде сплошного слоя осадка на стенке барабана, а осветлённая жидкость переливается в кожух и удаляется через расположенный внизу патрубок. По окончании процесса осадок выгружается из центрифуги.

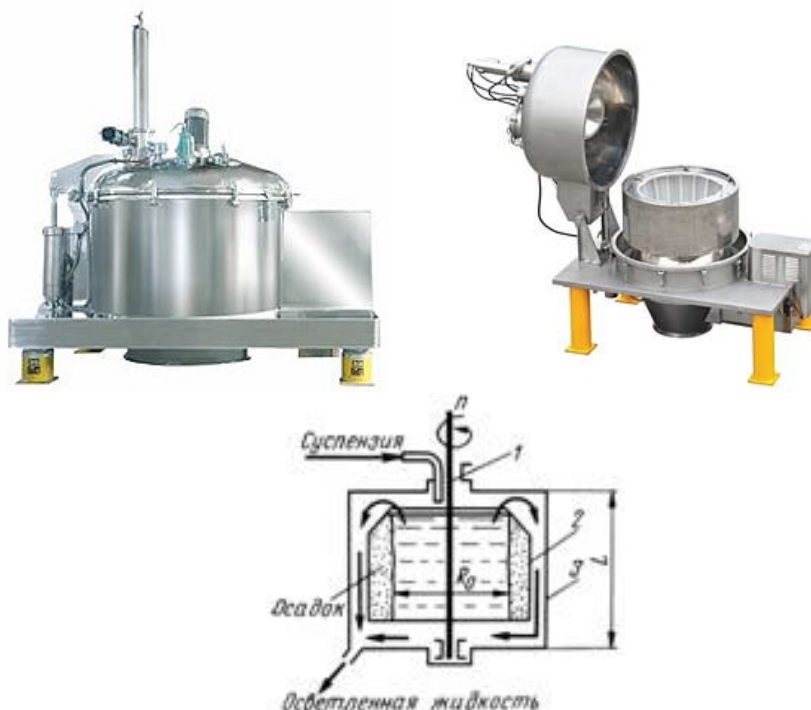


Рисунок 8.2 – Отстойная центрифуга:

1 – вал; 2 – барабан; 3 – корпус

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

В автоматических отстойных центрифугах (рисунок 8.3) загрузка материала, промывка, пропаривание и выгрузка осадка выполняются автоматически. Осадок после отделения жидкости снимается ножом 3 или скребком, который срезает его и направляет в желоб или на конвейер.

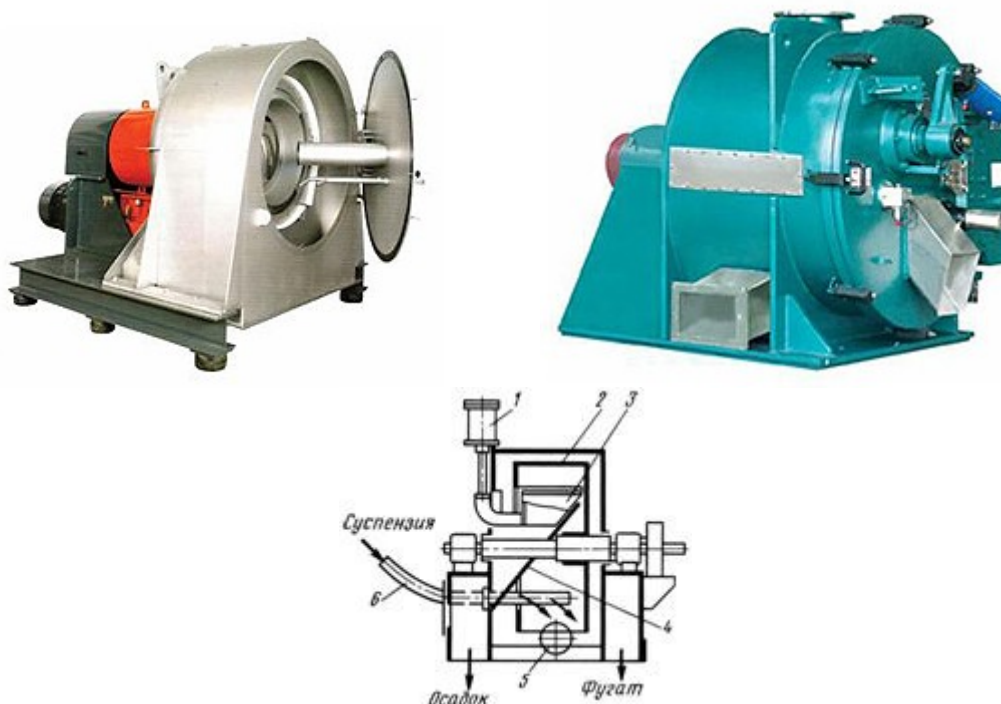


Рисунок 8.3 – Автоматическая отстойная центрифуга:

1 – гидравлический цилиндр; 2 – барабан; 3 – нож; 4 – желоб; 5 – штуцер для удаления фугата; 6 – труба для суспензии

Нож управляется при помощи гидравлического цилиндра; с ножом заблокирован пневматический молоток, который ударяет по желобу для облегчения выгрузки осадка.

Последовательность и продолжительность отдельных стадий полного цикла центрифугирования регулируются электрогидравлическим автоматом, который состоит из масляного насоса, редуктора и гидравлических цилиндров, управляемых сервомотором.

Описанная центрифуга предназначена для разделения грубых и средних суспензий.

Непрерывнодействующая отстойная горизонтальная центрифуга со шнековой выгрузкой осадка (НОГШ) применяются в крахмало-паточном производстве для получения концентрированного крахмального осадка и в других производствах.

Центрифуга (рисунок 8.4) состоит из ротора и внутреннего шнекового устройства, заключённых в корпус. Суспензия подаётся через центральную трубу в полый вал шнека. На выходе из этой трубы внутри шнека суспензия под действием центробежной силы распределяется в полости ротора.

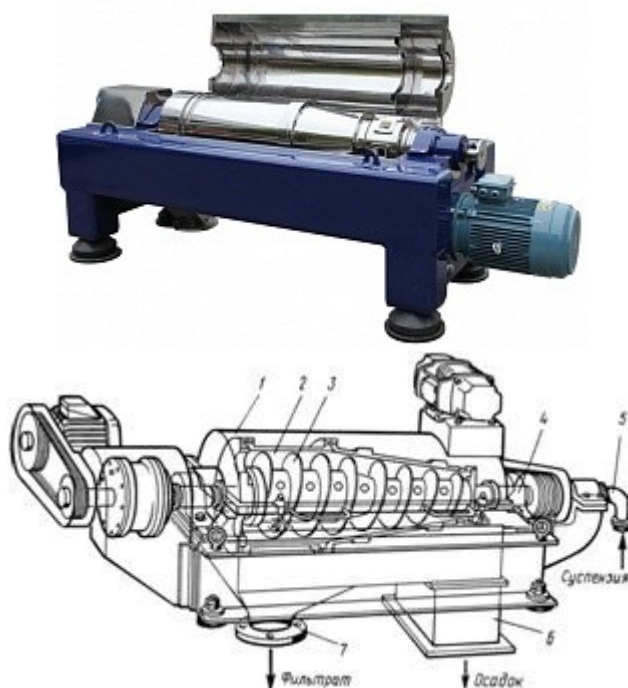


Рисунок 8.4 – Непрерывнодействующая отстойная горизонтальная центрифуга со шнековой выгрузкой осадка (НОГШ):

1 – корпус; 2 – ротор; 3 – шнековое устройство; 4 – полый вал; 5 – центральная труба; 6 – камера осадка; 7 – патрубок для фильтрата

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



Ротор отстойной горизонтальной центрифуги со шнековой выгрузкой осадка НОГШ

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

Осветлённая жидкость отводится через сливные отверстия в камеру фильтрата и удаляется через патрубок 4.

За счёт изменения частоты вращения ротора и шнека можно регулировать режим работы центрифуги, изменяя продолжительность отстаивания и выгрузки осадка.

Центрифуги типа НОГШ обладают высокой производительностью и применяются для разделения тонкодисперсных суспензий с высокой концентрацией твёрдой фазы.

Сепарирование, жидкостные сепараторы и циклоны.

Во многих пищевых производствах для осветления и разделения жидкостей широко применяются жидкостные сепараторы, работающие по принципу тонкослойного центрифугирования (сепарирования). В быстровращающемся барабане сепаратора процесс естественного отстаивания жидкости интенсифицируется вследствие замены ускорения свободного падения центростремительным ускорением и изменения рабочей высоты отстойника до межтарелочного зазора в пакете конических тарелок. Поэтому на сепараторах удастся выделить из центрифугируемой жидкости мельчайшие частицы ($0,1—0,5\text{ мкм}$) при разности плотностей фаз даже менее 100 кг/м^3 . Факторы разделения современных сепараторов в пределах $6000—10\,000$.

По технологическому назначению сепараторы делятся на три класса:

1_сепараторы-разделители, применяемые для разделения смеси жидкостей, нерастворимых одна в другой, и для концентрирования или сгущения суспензий и эмульсий;

2_сепараторы-осветлители, предназначенные для выделения твёрдых взвесей из жидкости;

3_комбинированные сепараторы служат для выполнения двух и более операций разделения жидкой смеси.

Иллюстрацией могут служить схемы барабанов осветлителя и разделителя, показанные на рисунке 8.5. В сепараторе-осветлителе (рисунок 8.5, а) взвешенные частицы, имеющие несколько большую плотность, чем осветляемая жидкость, движутся под действием центробежных сил по направлению к стенке барабана и скапливаются там в виде сгущённого осадка. Осветлённая жидкость, пройдя между тарелками, отводится через специальное приспособление и выводится из

сепаратора. Осадок удаляется из барабана при периодической его разборке и чистке или путём непрерывного спуска через регулируемые по величине отверстия.

В сепараторе-разделителе, приведённом на рисунке 8.5, б, тарелки имеют отверстия, образующие в пакете вертикальные каналы, через которые исходный продукт поступает в межтарелочные пространства. Отверстия расположены таким образом, что площади проекций на горизонтальную плоскость той части тарелок, которая расположена на периферии, и центрального участка соотносятся как объёмы тяжёлой и более лёгкой фракций, выводимых из барабана.

Особенностью конструкции сепараторов-разделителей является также наличие разделительной тарелки, установленной между пакетом тарелок и крышкой сепаратора. Эта тарелка имеет рёбра, образующие каналы, по которым отводится тяжёлая фракция.



Рисунок 8.5 – Схема барабанов сепараторов:

а – осветлителя; б – разделителя

При работе сепараторов исходная жидкость подается в барабан, проходит по каналам между основанием и тарелкодержателем и по каналам, образованным отверстиями в тарелках, поступает в пакет тарелок. Под действием центробежной силы происходит разделение жидкости на лёгкую и тяжёлую фракции. По специальным каналам, не смешиваясь, они выводятся из барабана.



Рисунок – Общий вид жидкостного сепаратора (см. ВИДЕО)



Сепаратор для жира (жировой сепаратор) ФСЦП-1 !!!!!!!!!!!

Тарельчатые сепараторы характеризуются высокой производительностью и высоким качеством разделения, однако имеют достаточно сложное устройство.

Значительное увеличение центробежной силы путём уменьшения радиуса вращения и одновременного увеличения частоты вращения заложено в основу конструирования центрифуг, называемых сверхцентрифугами. Фактор разделения в них $K_p > 3000$ и часто достигает несколько десятков тысяч, благодаря чему оказывается возможным разделение тонко дисперсных суспензий и эмульсий.



<http://agroserver.ru/user/218305/>

АГРОСЕРВЕР.ru

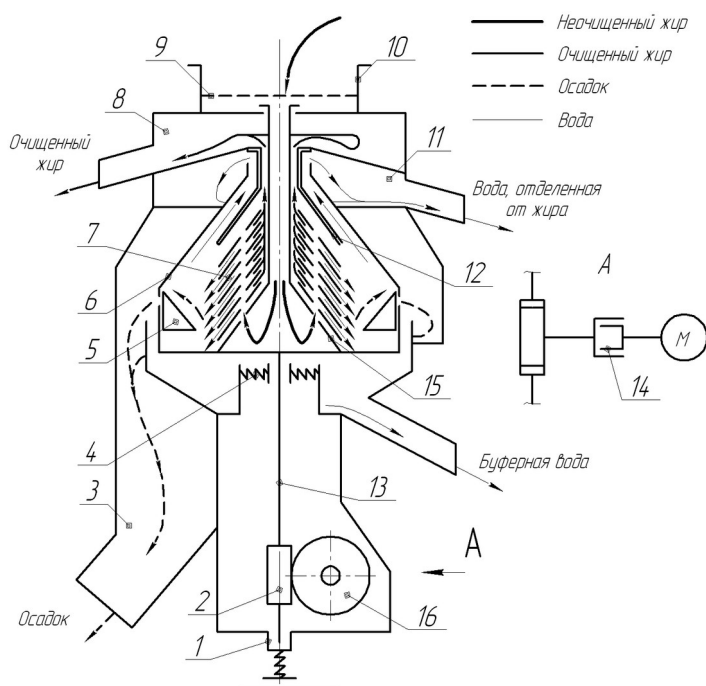


Рисунок 8.12 – Сепаратор марки РТ-ОМ4.6: 1 – подпятник-упорный подшипник; 2- винтовая шестерня; 3 – труба для слива осадка; 4 – горловой подпружиненный подшипник; 5 – поршень ротора; 6 – коническая крышка; 7 – тарелки; 8 – посуда для отвода жира; 9 – сетка-рассекатель; 10 – приёмник жира; 11 – посуда для отвода воды; 12 – разделительная тарелка; 13 – вертикальный вал; 14 – разгонная центробежная муфта; 15 – основание тарелкодержателя; 16 – колесо

Схема трубчатой сверхцентрифуги периодического действия для осветления жидкостей показана на рисунке 8.6. В кожухе 2 вращается трубчатый барабан (ротор) 1 со сплошными стенками, внутри которого имеются радиальные лопасти 5, препятствующие отставанию жидкости от стенок барабана при его вращении. Барабан жёстко соединён с коническим шпинделем 7, подвешенным на опоре 6, и приводится во вращение от шкива 5. В нижней части центрифуги установлен подпятник 4, через который в барабан проходит труба для ввода суспензии. Твёрдые частицы суспензии оседают на стенках барабана, а осветлённая жидкость выбрасывается из него через отверстия вверху и удаляется из верхней части кожуха. Осадок удаляют вручную периодически после остановки центрифуги и разборки ротора. Ввиду небольшого рабочего объёма центрифуги применяют только для разделения суспензии с небольшим содержанием твёрдой фазы (не более 1%).



Рисунок 8.6 – Трубчатая сверхцентрифуга периодического действия для осветления жидкостей (см. ВИДЕО):

1 – ротор; 2 – кожух; 3 – радиальные лопасти; 4 – подпятник; 5 – шкив; 6 – опора; 7 – шпиндель; 8 – отверстие для вывода осветлённой жидкости

Для разделения эмульсий применяют трубчатые сверхцентрифуги непрерывного действия, отличающиеся более сложным устройством верхней части ротора, позволяющим раздельно отводить расслоившиеся жидкости.

8.3 Циклоны

Циклонный процесс получил свое название от циклонов – аппаратов для разделения пылей. Позднее начали использовать работающие по тому же принципу аппараты для разделения суспензий – гидроциклоны. Применяют циклонный процесс и для отделения газа от капель жидкости.

Циклон (гидроциклоны) (рисунок 8.7) состоит из цилиндрического корпуса 1 с коническим днищем 2. Запылённый газ вводится в корпус 1 через штуцер тангенциально со скоростью $20-30 \text{ м/с}$. Благодаря тангенциальному вводу он приобретает вращательное движение вокруг

трубы для вывода очищенного газа, расположенной по оси аппарата. Частицы пыли под действием центробежной силы отбрасываются к стенкам корпуса. В аппарате создаются два спиральных потока: внешний поток запылённого газа, который движется вниз вдоль поверхности стенок циклона, и внутренний поток очищенного газа, который поднимается вверх, располагаясь вблизи оси аппарата, и удаляется из него. Пыль концентрируется вблизи стенок и переносится потоком в разгрузочный бункер 3.

Степень очистки газа в циклонах тем больше, чем больше фактор разделения Fr , который можно увеличить либо путём уменьшения радиуса вращения газового потока, либо увеличением его скорости, что сопряжено со значительным возрастанием гидравлического сопротивления и увеличением турбулентности газового потока (которая ухудшает процесс осаждения и способствует перемешиванию очищенного газа с запыленным). В то же время уменьшение радиуса циклона приводит к снижению его производительности. Поэтому при больших расходах запылённого газа вместо одного циклона большого диаметра применяют несколько циклонных элементов меньшего размера, объединённых в одном корпусе. Такие аппараты называют батарейными циклонами (мультициклонами).

На рисунке 8.8 показаны батарейный циклон и его элементы. В общем корпусе циклона 1 расположены циклонные элементы 3, герметично закреплённые в трубных решётках 4. Запылённый газ через входной штуцер поступает в газораспределительную камеру 2, а из неё в циклонные элементы, в кольцевое пространство между корпусом элемента 3 и патрубком для вывода очищенного газа. В этом пространстве размещены лопастные устройства 6, которые придают газовому потоку вращательное движение. Пыль отбрасывается к стенкам, движется вниз по спирали и ссыпается из всех элементов в общий бункер 5. Очищенный газ выходит из элементов по трубам в общую камеру и удаляется из аппарата через верхний штуцер.

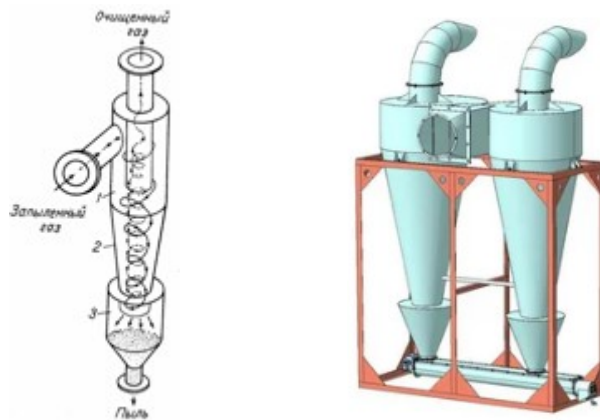


Рисунок 8.7 – Циклон:

1 – цилиндрический корпус; 2 – коническое днище; 3 – разгрузочный бункер

Диаметр одиночных циклонов обычно составляет от 40 до 1000 мм, а элементов батарейных циклонов от 40 до 250 мм.

В промышленности применяют циклоны разнообразных конструкций. Наиболее распространены циклоны НИИОгаза, отличительной особенностью которых является наклонный патрубок прямоугольного сечения, через который газ вводится в циклон. То обстоятельство, что газ получает спиральное направление движения уже при входе в циклон, способствует снижению гидравлического сопротивления аппарата.

Степень очистки газов от пыли в циклонах составляет для частиц диаметром 5 мкм 30–85%, диаметром 10 мкм – 70–95%, диаметром 20 мкм – 95–99%. В батарейных цикло-

нах степень очистки газа в несколько меньшей степени зависит от размера частиц: для указанных выше размеров (5, 10 и 20 мкм) она составляет соответственно 65–85, 85–90, 90–95%. Большая степень очистки газов достигается в циклонах с большим гидравлическим сопротивлением.

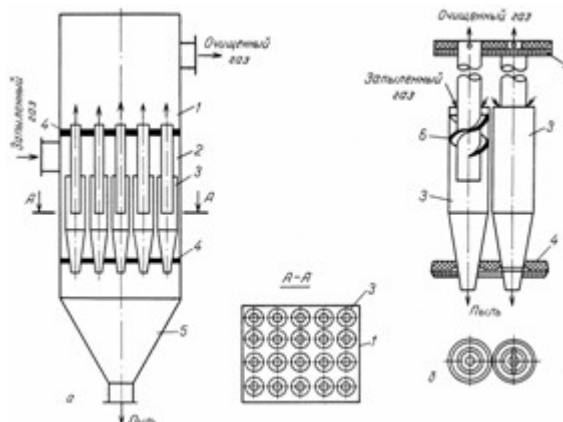


Рисунок 8.8 – Батарейный циклон (а) и его элементы (б):

1 – корпус; 2 – газораспределительная камера; 3 – корпуса циклонных элементов; 4 – трубные решётки; 5 – бункер для пыли; 6 – лопастные устройства для закручивания газового потока внутри элементов

Аппараты для проведения циклонного процесса характеризуются простотой конструкции, отсутствием движущихся частей, возможностью обработки химически агрессивных сред. Они обеспечивают повышенную степень разделения по сравнению с аппаратами гравитационного осаждения, более компактны.

К недостаткам их относятся сравнительно высокое гидравлическое сопротивление (в циклонах оно составляет $400-700 \text{ Па}$), невысокая степень улавливания частиц размером менее 10 мкм, механическое истирание корпуса аппарата твёрдыми частицами, чувствительность к колебаниям нагрузки по газу или жидкости. Поэтому аппараты циклонного типа не рекомендуется использовать, если требуется улавливать частицы размером менее 10 мкм и частицы, обладающие сильным абразивным действием.

Для проведения процессов осветления, обогащения суспензий, классификации твёрдых частиц по размерам от 5 до 150 мкм, а также для очистки сточных вод после мойки пищевого оборудования под действием центробежной силы применяются также гидроциклоны. Достоинствами этих аппаратов по сравнению с другими являются: простота устройства; невысокая стоимость; отсутствие движущихся частей; лёгкое обслуживание и компактность.

Гидроциклоны и мультигидроциклоны аналогичны по устройству циклонам и мультициклонам.

Суспензия через патрубок для входа (рисунок 8.9) подаётся в цилиндрическую часть гидроциклона тангенциально и приобретает вращательное движение.

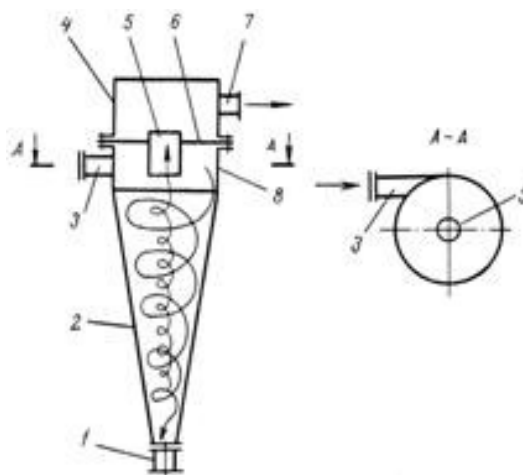


Рисунок 8.9 – Схема гидроциклона:

- 1 – патрубок для выхода осадка; 2 – коническая часть аппарата;
 3 – входной патрубок; 4 – камера для осветлённой жидкости;
 5 – патрубок в перегородке; 6 – перегородка; 7 – патрубок для выхода осветлённой жидкости; 8 – цилиндрическая часть аппарата

Под действием центробежной силы тяжёлые частицы отбрасываются к периферии и по стенкам циклона по спиральной траектории опускаются вниз. Лёгкая фракция удаляется через патрубок, расположенный в перегородке, попадает в камеру, отделённую от циклона, и выводится через патрубок для выхода осветлённой жидкости.

На эффект разделения оказывает главное влияние отношение диаметров нижнего и выходного (для слива) патрубков, которое принимают равным $0,37 - 0,40$.

Диаметры гидроциклонов имеют размеры в широком диапазоне. Как и для аэроциклонов, разделяющая способность гидроциклонов тем выше, чем меньше их диаметр. Гидроциклоны, применяемые в качестве классификаторов, имеют диаметр $300 - 350 \text{ мм}$ и высоту $1,0 - 1,2 \text{ м}$. Для сгущения грубых суспензий используются гидроциклоны диаметром 100 мм , для сгущения и осветления тонких суспензий – гидроциклоны диаметром $10 - 15 \text{ мм}$, обычно объединяемые в один агрегат, в котором они работают параллельно (мультигидроциклон).

Контрольные вопросы:

1. Какими методами можно повысить эффективность разделения неоднородных смесей по сравнению с отстаиванием?
2. Какой фактор характеризует разделяющую способность центрифуг?
3. Что является движущей силой процесса центрифугирования? Каково соотношение движущих сил в отстойниках и центрифугах?
4. Опишите устройство и работу осадительных центрифуг периодического и непрерывного действия.
5. Чем отличаются конструкции сепараторов?
6. Опишите процесс, протекающий в барабанах сепараторов осветлителей и разделителей.
4. В чём особенность назначения и устройства трубчатой сверхцентрифуги?
8. Что такое циклонный процесс? Как он протекает в аппаратах?
9. От каких факторов зависит степень очистки газов в циклонах?
10. Как устроен и работает гидроциклон?

Тема 7. Тепловые процессы и теплообменные аппараты

Цель занятия: изучение тепловых процессов и теплообменных аппаратов

Задачами занятия является освоение:

1. Теории тепловых процессов и конструктивных схем теплообменных аппаратов
2. Выполнение расчетов отдельных показателей по заданию преподавателя.

Формируемые компетенции

Код	Формулировка:
ОПК-3	способен использовать знания инженерных процессов при решении профессиональных задач и эксплуатации современного технологического оборудования и приборов
ПК-5	способностью проводить проектные расчеты, обосновывать и осуществлять технологические компоновки, подбор оборудования для производственных технологических линий, основных и вспомогательных помещений, в том числе с использованием информационных технологий

Теоретическая часть

(При этой части необходимо также использовать соответствующую тему из ЭКЛ)

Перенос энергии в виде тепла, происходящий между телами, имеющими различную температуру, называется **теплообменом**. Движущей силой любого процесса теплообмена является разность температур более нагретого и менее нагретого тел, при наличии которой тепло самопроизвольно, в соответствии со вторым законом термодинамики, переходит от более нагретого к менее нагретому телу. Теплообмен между телами представляет собой обмен энергией между молекулами, атомами и свободными электронами; в результате теплообмена интенсивность движения частиц более нагретого тела снижается, а менее нагретого – возрастает.

Исследования показали, что перенос теплоты является сложным процессом, поэтому при изучении тепловых процессов его расчлняют

- 1_теплопроводность,
- 2_тепловое излучение и
- 3_конвекция.

Явление теплопроводности состоит в том, что перенос теплоты происходит путём непосредственного соприкосновения между микрочастицами (молекулами, атомами, электронами) – от частиц с большей энергией к частицам с меньшей энергией, т. е. **процесс переноса теплоты теплопроводностью протекает по молекулярному механизму**. В подвижных средах (жидкость, газ) при турбулентном режиме движения потока молекулярный механизм переноса теплоты, т. е. теплопроводность, имеет существенное значение **в тонких, пограничных с твёрдой стенкой слоях**. При ламинарном движении потока или в неподвижной жидкости теплопроводность может быть основным видом переноса теплоты. Поскольку теплопроводность – явление молекулярное, то на скорость процесса переноса теплоты теплопроводностью существенное влияние оказывают структура и свойства вещества (например, для подвижных сред – вязкость, плотность и др.). В твёрдых телах, например в диэлектриках, перенос энергии осуществляется фононами, в металлах – электронами.

Явление теплового излучения – это процесс распространения энергии с помощью электромагнитных колебаний. Источником этих колебаний являются заряженные частицы – электроны и ионы, входящие в состав излучающего вещества. Твёрдые тела и жидкости излучают волны всех длин, т. е. дают сплошной спектр излучения. При переносе теплоты излучением тепловая энергия

вначале превращается в лучистую, а затем обратно: встречая на своем пути какое-либо тело, лучистая превращается в тепловую.

Явление конвекции состоит в том, что перенос теплоты осуществляется вследствие **движения и перемешивания макроскопических объёмов жидкости или газа**. При этом очень большое значение имеют состояние и характер движения жидкости или газа. Наряду с этим в движущейся жидкости из-за наличия градиента температур происходит перенос теплоты перемещающимися частицами жидкости из зоны с большей температурой в зону с меньшей, т. е. за счёт теплопроводности. **Таким образом, конвекция всегда сопровождается теплопроводностью.** Если массовое перемещение жидкости вызвано разностью плотностей в различных точках жидкости или газа (вследствие разности температур в этих точках), **такую конвекцию называют естественной, или свободной.** Если же перемещение жидкости или газа возникает вследствие затраты на это механической энергии (насос, мешалка и т.п.), такую конвекцию называют **принудительной, или вынужденной.**

Обычно в теплообменниках происходит сочетание рассмотренных видов переноса теплоты, причём в разных частях аппарата это сочетание может происходить по-разному. Например, в паровом котле от топочных газов к поверхности кипяtilьных трубок теплота передается всеми видами переноса – тепловым излучением, конвекцией, теплопроводностью; от внешней поверхности через слой сажи, металлическую стенку и слой накипи – только теплопроводностью и, наконец, от внутренней поверхности к кипящей воде теплота передается в основном конвекцией. Следовательно, отдельные виды теплопереноса в теплообменной аппаратуре протекают в самом различном сочетании, и разделить их между собой зачастую очень сложно. Поэтому в инженерных расчётах обычно рассматривают процесс переноса теплоты как одно целое.

Сложный теплообмен между двумя движущимися средами, разделёнными поверхностью фазового контакта или поверхностью нагрева (твёрдой стенкой), называется **ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕЙ**. Конвективный теплообмен между поверхностью нагрева или фазового контакта и движущейся средой называется теплоотдачей.

Задачи тепловой обработки пищевых продуктов разнообразны. В зависимости от целей технологии происходят следующие тепловые процессы:

- а) нагревание и охлаждение однофазных и многофазных сред (жидкостей, высококонцентрированных растворов, бинарных смесей, суспензий, эмульсий);
- б) конденсация паров химически однородных жидкостей (воды, аммиака, фреонов) и их смесей (например, водоспиртовых паров);
- в) конденсация водяных паров из паровоздушных смесей (при осушении воздуха);
- г) испарение воды в парогазовую среду (при увлажнении воздуха, сушке материалов, выпечке хлеба);
- д) кипение жидкостей (воды, высококонцентрированных растворов и сложных неоднородных систем).

Теплообмен между **различными теплоносителями** наиболее часто происходит при следующих сочетаниях тепловых процессов:

- а) нагревание «холодной» жидкости за счёт охлаждения «горячей»;
- б) нагревание жидкости за счёт теплоты конденсации греющего пара;
- в) кипение жидкости за счёт охлаждения «горячей» жидкости;
- г) кипение жидкости за счёт теплоты конденсации греющего пара.

В пищевых производствах широко применяется рациональное теплоиспользование, когда в качестве греющего теплоносителя используются жидкие пищевые продукты, вторичные пары и конденсаты. В большинстве случаев непосредственный контакт пищевых продуктов с другими теплоносителями недопустим, поэтому теплопередачу осуществляют в различных теплообменниках с поверхностью нагрева – твёрдой стенкой, разделяющей рабочие среды. Такие теплообменники **называются поверхностными**. Поверхность нагрева конструктивно выполняется в виде **труб, пластин, рубашек и др.**

Основы теплопередачи

Перенос теплоты от более нагретой среды к менее нагретой через разделяющую их стенку называют теплопередачей. Оба вещества, участвующих в теплопередаче, называют теплоносителями (один, более нагретый, – горячим, а другой, менее нагретый, – холодным теплоносителем). Теплопередача является суммарным эффектом переноса теплоты различными способами при прохождении теплового потока через рассматриваемую систему. Тепловым потоком называется количество теплоты, проходящее в единицу времени через произвольную поверхность.

Иногда в случае возможности смешения теплоносителей теплопередачу осуществляют непосредственным соприкосновением (смешением) этих теплоносителей. При этом процесс теплопередачи протекает значительно эффективнее, а аппаратурное оформление процесса существенно упрощается. Поскольку в пищевых производствах перенос теплоты при непосредственном контакте теплоносителей встречается довольно редко, то в дальнейшем основное внимание будет уделено теплопередаче от одной среды к другой через разделяющую их стенку.

Различают установившийся и неуставившийся процессы теплопередачи. При установившемся (стационарном) процессе температура является функцией только системы координат, т. е. $t = f(x, y, z)$ и не зависит от времени. При неуставившемся (нестационарном)

процессе температура изменяется в пространстве и времени, т. е. $t = f(x, y, z, \tau)$.

Установившиеся процессы соответствуют непрерывной работе аппаратов с постоянным режимом (гидродинамическим и тепловым, т. е. температурным). Неуставившиеся процессы имеют место в аппаратах периодического действия, а также при пуске, остановке и изменении режимов работы аппаратов непрерывного действия.

Теплопередача в технологической аппаратуре отличается рядом особенностей. В аппаратуре пищевых производств процессы теплообмена между рабочими средами протекают наряду с основными технологическими процессами и в ряде случаев одновременно с переносом массы – массообменом. Тепловое воздействие на пищевые продукты является необходимым условием технологических процессов большинства пищевых производств. Процесс теплопередачи в технологических аппаратах сопровождает или обеспечивает разнородные физико-химические процессы, в том числе и фазовое превращение вещества. В процессе тепловой обработки пищевые среды (хлебопекарное тесто, мармелад, карамель, молоко, сахарные растворы и др.) претерпевают во времени качественные превращения, что вызывает соответствующее изменение условий теплопередачи. Поэтому многие процессы теплообмена в пищевых средах происходят в переменных, нестационарных условиях.

Необходимым условием передачи тепла является неравенство температур в различных точках данного тела или пространства. Поэтому величина теплового потока, возникающего в среде, зависит от распределения температур в среде или характера температурного поля. Под температурным полем понимают совокупность мгновенных значений температур во всех точках рассматриваемой среды.

Геометрическое место всех точек с одинаковой температурой представляет собой изотермическую поверхность. Изотермические поверхности не пересекаются друг с другом, так как тогда их пересечения имели бы различные температуры. Поэтому все изотермические поверхности замыкаются или кончаются на границах рассматриваемого тела.

Пусть температура одной изотермической поверхности t , а другой, близлежащей изотермической поверхности, $t + \Delta t$. Предел отношения разности температур Δt этих двух поверхностей к расстоянию по нормали Δl между ними

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

называют температурным градиентом, который представляет собой производную от температуры по нормали к изотермической поверхности. При $dt/dl = 0$ наступает равновесие – поток теплоты прекращается. Температурный градиент является мерой интенсивности изменения температуры в данной точке. Направление теплового потока всегда совпадает с направлением падения температуры в данной точке. Тогда удельный поток теплоты q (количество теплоты, передаваемое через единицу поверхности в единицу времени) будет равен $q = (dt/dl)$. Таким образом, в отличие от температуры, которая является скаляром, плотность потока теплоты представляет собой векторную величину.

Основными кинетическими характеристиками процесса теплопередачи являются:

- 1_средняя разность температур,**
- 2_коэффициент теплопередачи,**
- 3_количество передаваемой теплоты (от этой величины зависят размер теплообменной аппаратуры).**

Связь между ними определяет **основным уравнение теплопередачи:**

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

которое для установившегося процесса имеет вид

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

где K – кинетический коэффициент (коэффициент теплопередачи), характеризующий скорость переноса теплоты; F – площадь поверхности теплообмена Δt_{cp} – средняя движущая сила или средняя разность температур между теплоносителями (средний температурный напор), по поверхности теплопередачи; $d\tau$ – продолжительность процесса.

Тепловой поток Q обычно определяют из **теплового баланса**. При этом в общем случае (без учёта потери теплоты в окружающую среду)

$$Q = Q_1 = Q_2, \text{ или } Q = G_1(i_{1н} - i_{1к}) = G_2(i_{2к} - i_{2н}),$$

где Q_1 – количество теплоты, отдаваемое горячим теплоносителем; Q_2 – количество теплоты, принимаемое холодным теплоносителем; G_1 и G_2 – расход, соответственно, горячего и холодного теплоносителей; $i_{1н}$ и $i_{1к}$ – начальная и конечная энтальпия горячего теплоносителя; $i_{2н}$ и $i_{2к}$ – начальная и конечная энтальпия холодного теплоносителя.

Если теплоносители не меняют своего агрегатного состояния в процессе теплопередачи (процесс нагревания и охлаждения), то уравнение теплового баланса (9.4) принимает следующий вид:

$$Q = G_1 c_1 (t_{1н} - t_{1к}) = G_2 c_2 (t_{2к} - t_{2н}),$$

где c_1 и c_2 – теплоёмкости горячего и холодного теплоносителя (при средней температуре теплоносителя).

Если необходимо учесть потери тепла в окружающую среду, то полученное по уравнениям (9.4) и (9.5) значение Q следует повысить на величину этих потерь. Обычно потери теплоты в окружающую среду теплоизолированными стенками теплообменников не превышает 3–5% от Q .

Движущая сила процесса Δt_{cp} представляет собой среднюю разность температур между температурами теплоносителей, которая определяется по начальным и конечным их температурам.

Коэффициент теплопередачи (K) показывает, какое количество теплоты передаётся от одного теплоносителя к другому через разделяющую их стенку площадью 1 м^2 в течение 1 с при разности температур между теплоносителями 1 град . Он зависит от режима движения теплоносителей, а также от условий, в которых протекает теплопередача.

Основное уравнение теплопередачи обычно используют для определения площади поверхности теплообмена (теплопередачи):

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

Теплопроводность

Величину теплового потока Q , возникающего в теле вследствие теплопроводности при некоторой разности температур в отдельных точках тела, определяют по закону Фурье – основному закону теплопроводности:

$$Q = -\lambda F \tau \frac{dt}{dl},$$

или

$$q = \frac{Q}{F \tau} = -\lambda \frac{dt}{dl} = -\lambda \text{grad} t,$$

где λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$; q – плотность теплового потока – количество теплоты, передаваемое через единицу поверхности в единицу времени; знак «-» указывает на то, что тепловой поток изменяется в сторону уменьшения температуры.

Коэффициент теплопроводности показывает, какое количество теплоты проходит вследствие теплопроводности в единицу времени через единицу поверхности теплообмена при падении температуры на один градус на единицу длины нормали к изотермической поверхности.

Коэффициент теплопроводности является физической характеристикой вещества, определяющей способность тела проводить теплоту; он зависит от природы веществ и агрегатного состояния, температуры и давления. Коэффициент теплопроводности газов возрастает с повышением температуры и почти не зависит от давления. Для жидкостей, за исключением воды и глицерина, наоборот, λ уменьшается с повышением температуры. Для большинства твёрдых тел λ увеличивается с повышением температуры.

На базе основного уравнения переноса субстанций получается дифференциальное уравнение теплопроводности в неподвижной среде, называемое также уравнением Фурье и записываемое в следующем виде:

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \left(\frac{d^2 t}{dx^2} + \frac{d^2 t}{dy^2} + \frac{d^2 t}{dz^2} \right),$$

где c – удельная теплоёмкость материала, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{град})$; ρ – плотность материала, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\lambda/c\rho = a$ – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$.

При установившемся процессе $dt/d\tau = 0$, и уравнение (9.9) примет вид

$$\frac{\lambda}{c\rho} \left(\frac{d^2 t}{dx^2} + \frac{d^2 t}{dy^2} + \frac{d^2 t}{dz^2} \right) = 0$$

Поскольку коэффициент α не может быть равен нулю, то, следовательно

$$\left(\frac{d^2 t}{dx^2} + \frac{d^2 t}{dy^2} + \frac{d^2 t}{dz^2} \right) = 0$$

Уравнение (9.11) является дифференциальным уравнением теплопроводности в неподвижной среде при установившемся тепловом режиме, описывающее в общем виде распределение температур при переносе теплоты.

Уравнение теплопроводности (9.9) позволяет решать вопросы, связанные с распространением теплоты теплопроводностью в условиях как установившегося, так и не установившегося процесса. При решении конкретных задач уравнение теплопроводности должно быть дополнено соответствующими уравнениями, описывающими начальные и граничные условия.

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

Пусть температура стенки со стороны горячего теплоносителя равна t_{cm1} , а со стороны холодного – t_{cm2} ; теплопроводность материала стенки λ ; толщина стенки δ . Как видно из рисунка 9.1, а, температурное поле одномерно и температур изменяются только в направлении оси x .

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

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

где λ/δ – тепловая проводимость стенки.

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

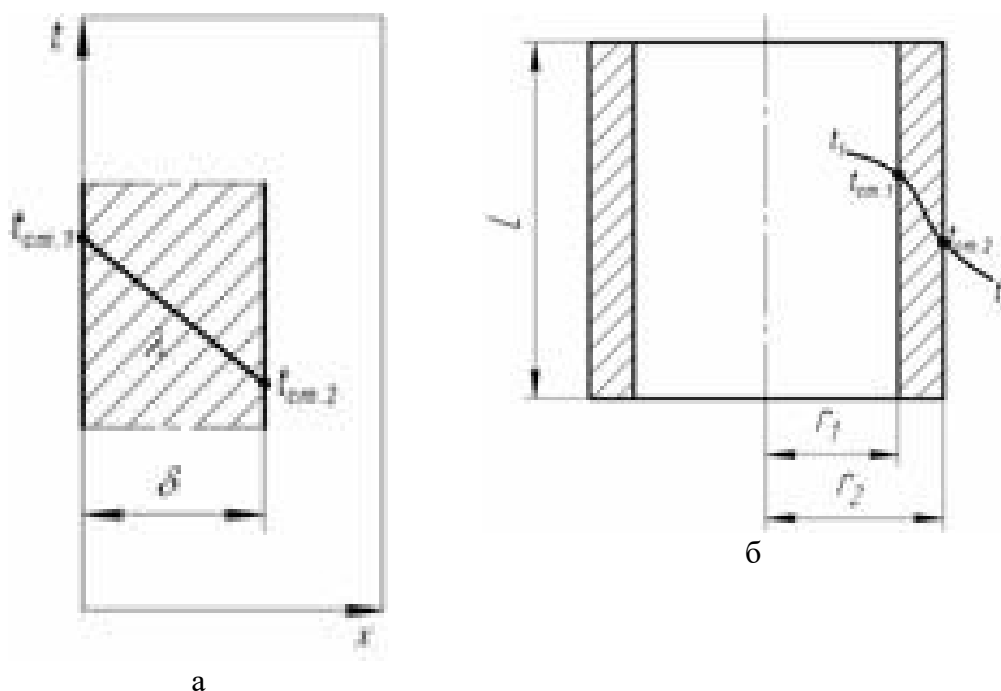


Рисунок – К уравнению теплопроводности плоской (а) и цилиндрической стенок (б)

В случае двухслойной стенки, например, эмалированной или многослойной с разными коэффициентами теплопроводности и толщиной, к каждому слою можно применить уравнение (9.12). Тогда

$$Q = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\delta_i} (t_{cm1} - t_{cm2}) F \tau$$

Из данного уравнения следует, что для многослойной стенки термическое сопротивление равно сумме термических сопротивлений отдельных слоёв.

Также можно получить уравнение теплопроводности цилиндрической стенки (рисунок 9.1, б) при установившемся режиме теплопереноса (рассмотрение ведётся в цилиндрических координатах):

$$Q = \frac{2\pi L(t_{cm1} - t_{cm2})\tau}{\frac{1}{\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1}}$$

Из этого уравнения видно, что по толщине цилиндрической стенки температура изменяется по криволинейному (логарифмическому) закону.

В том случае, когда отношение $r_2/r_1 < 2$ (что характерно, например, для обычных металлических труб, из которых формируются теплообменники), уравнение (9.14) может быть без заметной ошибки заменено уравнением теплопроводности плоской стенки.

Тепловое излучение

Тепловое излучение, или лучистый теплообмен, представляет собой перенос теплоты электромагнитными волнами различной длины. При тепловом излучении происходит превращение тепловой энергии в лучистую и лучистой в тепловую. Этот способ переноса теплоты возможен между твёрдыми, жидкими и газообразными телами.

Длины волн теплового излучения лежат в невидимой (инфракрасной) части спектра в пределах $0,8 - 800 \text{ мкм}$. Все тела обладают способностью излучать энергию, которая поглощается другими телами и вновь превращается в теплоту.

Тепловое излучение имеет одинаковую природу со световым излучением и подчиняется общим законам физики. В однородном пространстве оно распространяется прямолинейно. Попадая на тело, оно частично поглощается, частично отражается и частично проходит сквозь тело без изменений. Исходя из этого, баланс лучистой энергии падающих на тело лучей можно представить следующим уравнением:

$$Q_{\text{л}} = Q_{\text{п}} + Q_{\text{о}} + Q_{\text{пр}}, \quad 9.15$$

где $Q_{\text{л}}$ – общая лучистая энергия падающих на тело лучей, Дж; $Q_{\text{п}}$ – поглощённая телом лучистая энергия, превращенная в тепловую, Дж; $Q_{\text{о}}$ – отражённая лучистая энергия, Дж; $Q_{\text{пр}}$ – лучистая энергия, прошедшая через тело без изменения, Дж.

Контрольные вопросы

1. Какие технологические процессы относятся к тепловым?
2. Какие виды переноса теплоты участвуют в теплообмене?
3. Каковы задачи тепловой обработки пищевых продуктов?
4. Какие возможны сочетания тепловых процессов?

5. Что такое установившийся и неуставившийся процессы теплопередачи?
6. Приведите понятие температурного градиента и изотермической поверхности.
4. Каким уравнением определяется связь между количеством переданной теплоты и размерами теплообменной аппаратуры?
8. Каков вид уравнений теплового баланса в зависимости от агрегатного состояния теплоносителей?
9. Какой физический смысл имеет коэффициент теплопередачи?
10. В чём заключается смысл закона теплопроводности Фурье?
11. Какой физический смысл имеет коэффициент теплопроводности?
12. Какими законами описывается процесс передачи теплоты излучением?
13. От каких факторов зависит излучательная способность тела?
14. Какой процесс называется теплоотдачей и каким законом он описывается?
15. Чем характеризуется теплоотдача при естественной и вынужденной конвекции?
16. В чём смысл уравнения теплоотдачи и какой физический смысл имеет коэффициент теплоотдачи?

Тема 8. Процессы массопередачи

Цель занятия: изучение процессов и аппаратов массоотдачи

Задачами занятия является освоение:

1. Теории процессов и аппаратов для массоотдачи.
2. Выполнение расчетов отдельных показателей по заданию преподавателя.

Формируемые компетенции

Код	Формулировка:
ОПК-3	способен использовать знания инженерных процессов при решении профессиональных задач и эксплуатации современного технологического оборудования и приборов
ПК-5	способностью проводить проектные расчеты, обосновывать и осуществлять технологические компоновки, подбор оборудования для производственных технологических линий, основных и вспомогательных помещений, в том числе с использованием информационных технологий

Теоретическая часть

(При этой части необходимо также использовать соответствующую тему из ЭКЛ)

Процессами массообмена называют такие процессы, в которых основную роль играет перенос вещества из одной фазы в другую. Движущей силой этих процессов является разность химических потенциалов. Как и в любых других процессах, движущая сила массообмена характеризует степень отклонения системы от состояния динамического равновесия. В пределах данной фазы вещество переносится от точки с большей к точке с меньшей концентрацией. Поэтому обычно в инженерных расчётах приближённо движущую силу выражают через разность концентраций, что значительно упрощает расчёты массообменных процессов.

Массообменные процессы широко используются в промышленности для решения задач разделения жидких и газовых гомогенных смесей, их концентрирования, а также для защиты окружающей природной среды (прежде всего для очистки сточных вод и отходящих газов).

Наибольшее распространение в пищевой технологии 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. Процесс перегонки и ректификации применяются в **спиртовом, ликёро-водочном, эфиромасличном, коньячном, масло-жировом и других производствах**.

3. Экстракция (жидкостная) – извлечение растворённого 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 растворённого вещества или группы веществ сравнительно невысоких концентраций. Экстракция используется в **пивоваренном, ферментном, масло-жировом и других производствах**.

4. Адсорбция – избирательное поглощение газов, паров или растворённых в жидкости веществ **твёрдым поглотителем**, способным поглощать одно или несколько веществ из смеси. Этот процесс представляет собой переход веществ из газовой, паровой или жидкой фазы в твёрдую. Адсорбцию применяют для извлечения того или иного вещества (или веществ) достаточно низкой концентрации из их смеси. Процесс применяют в **сахарном, масло-жировом, пивоваренном и других производствах**.

Процесс, обратный адсорбции, т. е. выделение сорбированного вещества из твёрдого поглотителя, называют **десорбцией**.

5. Ионный обмен – избирательное извлечение ионов из растворов электролитов. Этот процесс представляет собой переход извлекаемого вещества из жидкой фазы в твёрдую. Процесс применяют для извлечения веществ из растворов, в которых эти вещества находятся **при низких концентрациях**. Используется в **пивобезалкогольной, ликёро-водочной, молочной, сахарной, консервной промышленности и в виноделии**.

6. Сушка – удаление влаги из твёрдых влажных или жидких материалов, в основном путем её испарения. Этот процесс представляет собой переход влаги из твёрдого влажного материала в газовую или паровую фазы. Сушку широко применяют в технике для предварительного обезвоживания перерабатываемых веществ или обезвоживания готового продукта.

7. Растворение и экстрагирование из твёрдых тел – это процессы перехода **твёрдой фазы в жидкую (растворитель)**. Извлечение на основе избирательной растворимости какого-либо вещества (или веществ) из твёрдого пористого материала называют экстракцией из твёрдого материала, или выщелачиванием (экстрагированием). Применяют её для извлечения ценных или токсичных компонентов из твёрдых материалов. Находит применение в **свекло-сахарном, масло-жировом, консервном и других производствах**.

8. Кристаллизация – **выделение твёрдой фазы в виде кристаллов из растворов или расплавов**. Этот процесс представляет собой переход вещества из жидкой фазы в твёрдую. Применяется, в частности, для получения **веществ повышенной чистоты**. Широко используется при производстве **сахара, глюкозы, поваренной соли** и других продуктов.

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. При этом **граница соприкосновения** – т. е. поверхность контакта фаз – может быть подвижной (система газ–жидкость, пар–жидкость, жидкость–жидкость) или неподвижной (газ–твёрдое тело, пар–твёрдое тело, жидкость–твёрдое 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).

Массообменные процессы обычно обратимы, т. е. распределяемое между фазами вещество может переходить из одной фазы в другую в зависимости от условий равновесия фаз. Это равновесие, например концентрация растворённого вещества в двух взаимодействующих фазах, **зависит от температуры и давления**. Направление перехода вещества определяется концентрациями вещества в фазах и условиями равновесия. Связь между параметрами в условиях равновесия может быть представлена уравнениями, таблицами или графиками.

Кинетика массопередачи

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 слоёв данной (первой) фазы к поверхности раздела фаз и, пройдя её, распределяется во всём объёме 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.

Наиболее быстро молекулярная диффузия протекает в газах. Скорость диффузии в газах определяется скоростью теплового движения молекул и длиной их свободного пробега. Чем больше скорость и длина свободного пробега молекул, тем больше и скорость диффузии.

Диффузия в жидкостях происходит гораздо медленнее, чем в газах, и механизм её состоит в том, что молекулы вырываются из данного окружения молекулами жидкости и скачками переходят в окружение других частиц жидкости.

Молекулярная диффузия в жидкостях и газах в чистом виде наблюдается только в случае их абсолютной неподвижности (конвекция исключена). В твёрдых телах перенос вещества осуществляется исключительно путём молекулярной диффузии.

Конвективный перенос (конвективная диффузия) характеризуется перемещением (переносом) вещества движущимися частицами потока в условиях турбулентного движения фаз. Конвективный перенос вещества под действием турбулентных пульсаций иногда называют турбулентной диффузией.

В массообмене участвуют, как минимум, три вещества:

- 1_распределяющее вещество (или вещества), составляющее первую фазу;
- 2_распределяющее вещество (или вещества), составляющее вторую фазу;
- 3_распределяемое вещество (или вещества), которое переходит из одной фазы в другую.

Обозначим первую фазу G , вторую L , а распределяемое вещество M . Все массообменные процессы обратимы, поэтому распределяемое вещество может переходить из фазы G в фазу L и наоборот в зависимости от концентрации вещества в фазах.

Пусть распределяемое вещество находится первоначально только в фазе G и имеет концентрацию Y . В фазе L в начальный момент распределяемое вещество отсутствует, т. е. концентрация его в этой фазе $X = 0$.

Если распределяющие фазы 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 . До некоторого момента времени число частиц распределяемого вещества M , переходящих в единицу времени из фазы G в фазу L , больше, чем число частиц, переходящих из фазы L в фазу G . Однако конечным результатом является переход вещества M из фазы G в фазу L . По истечении определенного времени скорости прямого и обратного перехода вещества M в фазах G и L становятся одинаковыми. Такое состояние системы называется равновесным. При равновесии устанавливается строго определённая зависимость между концентрациями распределяемого вещества в фазах. Такие концентрации называются равновесными.

При равновесии каждой концентрации x соответствует равновесная концентрация y_p и, наоборот, каждой концентрации y соответствует определенная равновесная концентрация x_p .

В условиях равновесия существуют определённые в каждом конкретном случае зависимости между концентрациями:

$$y_p = f_1(x), \quad x_p = f_2(y).$$

Эти зависимости определяются экспериментально и называются равновесными зависимостями, которые изображаются графически кривой или в частном случае прямой линией. На рисунке 11.1 показана зависимость равновесной концентрации y компонента в газовой фазе G от его концентрации x в жидкой фазе L при постоянных давлении и температуре.

Отношение концентраций компонента в фазах в условиях равновесия $m = y_p / x$ называется коэффициентом распределения. Коэффициент распределения геометрически выражает тангенс угла наклона линии равновесия. В случае кривой линии равновесия коэффициент распределения является переменной величиной. Конкретный вид законов равновесия применительно к различным процессам массопередачи будет рассматриваться в соответствующих лекциях.

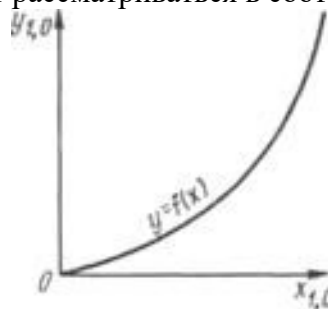


Рисунок – Диаграмма равновесия при $p = const$ и $t = const$

Равновесные зависимости позволяют определить не только направление процесса, но и скорость перехода распределяемого вещества из одной фазы в другую.

Разность между фактической и равновесной концентрациями, характеризующая степень недостижения равновесия, является движущей силой массообменных процессов.

Расчёт движущих сил и коэффициентов скорости массообменных процессов составляет кинетику массопередачи. Согласно общему кинетическому уравнению (2.8) скорость массообменных процессов прямо пропорциональна движущей силе процесса и обратно пропорциональна диффузионному (массообменному) сопротивлению.

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

$$\frac{dM}{F d\tau} = \frac{\Delta}{R} = K\Delta,$$

где M – количество вещества, перешедшего из одной фазы в другую; F – площадь поверхности массопередачи; τ – продолжительность процесса; K – коэффициент характеризующий скорость процесса переноса вещества из одной фазы в другую, называемый в теории массопередачи коэффициентом массопередачи (по аналогии с процессом теплопередачи); Δ – движущая сила.

Нетрудно видеть, что $dM/F d\tau$ является скоростью массопередачи, отнесённой к единице контакта фаз.

Если dM отнесено к единице времени, имеем

$$dM = K\Delta dF.$$

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

$$M = K\Delta F.$$

Уравнения (11.3) и (11.4) называются основными уравнения массопередачи. Согласно этим уравнениям количество вещества, перенесённое из ядра одной фазы в ядро другой фазы, пропорционально разности его концентраций в ядрах фаз, площади поверхности фазового контакта и продолжительности процесса.

Коэффициент массопередачи показывает, какое количество вещества переходит из фазы в фазу в единицу времени через единицу поверхности контакта фаз при движущей силе, равной единице. Коэффициенты массопередачи в зависимости от единиц, в которых выражены движущая сила и количество распределяемого вещества, могут выражаться в м/с , $\text{кг}/(\text{ед. д.в. сил} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с})$, $\text{кмоль}/(\text{ед. д.в. сил} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с})$. Величина K является функцией многих переменных, и единого уравнения для определения значения K нет.

Обычно уравнение массопередачи применяют для определения поверхности F контакта фаз, а исходя из этой поверхности – размеров массообменных аппаратов.

Материальный баланс массообменных процессов

Материальные балансы конкретных массообменных процессов будут рассмотрены ниже в соответствующих лекциях. В этой лекции рассмотрим подход к составлению материальных балансов массообменных процессов с учётом их специфики.

Для периодических процессов, как правило, при малой производительности, характерно **однократное взаимодействие фаз**. При этом фаз смешиваются, а после завершения процесса разделяются (например, проведение периодического процесса жидкостной экстракции в аппарате с мешалкой).

Материальный баланс такого процесса в целом и по i -му компоненту имеет вид

$$G_H + L_H = G_K + L_K,$$

$$G_H y_{iH} + L_H x_{iH} = G_K y_{iK} + L_K x_{iK},$$

где G_H и G_K – начальное и конечное количество первой фазы; L_H и L_K – начальное и конечное количество другой фазы; y_{iH} и x_{iH} , y_{iK} и x_{iK} – начальные и конечные концентрации i -го компонента в каждой фазе, соответственно.

Если величины G и L мало изменяются с изменением состава, т. е. $G_H \approx G_K$ и $L_H \approx L_K$, то из уравнения (11.6) получаем

$$y_{iK} = y_{iH} + \frac{L}{G}(x_{iH} - x_{iK})$$

Уравнение (11.7) выражает составы получаемых продуктов разделения в зависимости от относительного расхода фаз L/G и является **уравнением рабочей линии**.

В массообменных аппаратах непрерывного действия процесс может происходить при непрерывном контакте фаз (например, в абсорбционных аппаратах плёночного типа, представляющих собой, по существу, кожухотрубчатый теплообменник, по внутренним поверхностям трубок которого течёт плёнка жидкости, а навстречу этой жидкости движется газ). При этом концентрации распределяемого вещества в фазах изменяются монотонно.

В массообменных аппаратах ступенчатого типа (например, в вертикальных аппаратах с горизонтальными перегородками–тарелками) в каждой ступени происходит взаимодействие фаз, а на входе из ступени – их разделение. Проведение процесса при непрерывном и ступенчатом взаимодействии фаз существенно зависит от направления относительного движения фаз (прямоток, противоток и др.) и гидродинамической структуры их потоков.

Рассмотрим схему элементарного массообменного аппарата (рисунок 11.2), в котором осуществляется массообмен между двумя движущимися противотоком фазами.

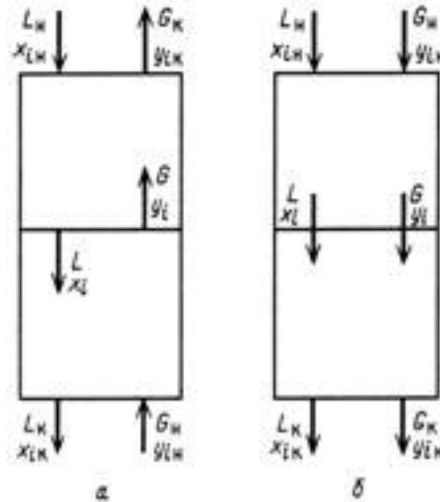


Рисунок – Схема потоков в аппарате

Материальный баланс для произвольного сечения аппарата при бесконечно малом пути выражается следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} &\text{по всему потоку} - dG = dL; \\ &\text{по } i\text{-м} \text{ компоненту} - d(Gy_i) = d(Lx_i). \end{aligned}$$

Интегрирование в пределах от начальных значений входящих в это соотношение величин до их значений в произвольном сечении даёт

$$\begin{aligned} G_H - L_K &= G_K - L_H = G - L, \\ G_H y_{iH} - L_K x_{iK} &= G_K y_{iK} - L_H x_{iH} = G y_i - L x_i. \end{aligned}$$

При малом изменении величин G и L по высоте аппарата

$$y_i = y_{iH} + \frac{L}{G}(x_i - x_{iK}) = y_{iK} + \frac{L}{G}(x_i - x_{iH})$$

Соотношение (11.10) называют уравнением рабочей линии непрерывного противоточного массообменного процесса. Оно выражает связь составов взаимодействующих фаз в произвольном сечении аппарата. При $L/G = \text{const}$ рабочая линия прямая. Если $L/G \neq \text{const}$, то рабочая линия отклоняется от прямой.

Аналогично для проточного движения фаз получим

$$y_i = y_{iH} - \frac{L}{G}(x_i - x_{iH})$$

Уравнение (11.11) является уравнением рабочей линии непрерывного проточного массообменного процесса.

Уравнения (11.10) и (11.11) получены для условия отсутствия продольного перемешивания в массообменном аппарате, т. е. для модели идеального вытеснения.

При совместном построении линии равновесия y^p и рабочей линии массообменного процесса в координатах $y-x$ можно установить направление массопередачи.

Если рабочая линия расположена выше линии равновесия, например, при абсорбции, то для произвольно выбранной точки на рабочей линии концентрации $y > y^p$ и $x < x^p$. При этом, стремясь к равновесным концентрациям, y снижается, а x повышается в процессе переноса вещества, т. е. распределяемый компонент переходит из фазы G в фазу L .

Если рабочая линия расположена ниже линии равновесия, например, при ректификации, то для любой точки рабочей линии $y < y^p$ и $x > x^p$. При этом распределяемый компонент будет переходить из фазы L в фазу G , стремясь к равновесным концентрациям y^p и x^p .

1 Законы Фика

Закон молекулярной диффузии (первый закон Фика), основанный на том, что диффузия в газах и растворах жидкостей происходит в результате хаотического движения молекул, приводящего к переносу молекул распределяемого вещества из зоны высоких концентраций в зону низких концентраций, гласит: количество продиффундировавшего вещества пропорционально градиенту концентраций, площади, перпендикулярной направлению диффузионного потока, и продолжительности процесса:

$$dM = -DdF d\tau \frac{dc}{dn};$$

где dM – количество продиффундировавшего вещества; D – коэффициент пропорциональности, или коэффициент молекулярной диффузии; dc/dn – градиент концентраций в направлении диффузии; dF – элементарная площадка, через которую происходит диффузия; $d\tau$ – продолжительность диффузии.

Для всей поверхности F диффузии первый закон Фика выразится так

$$M = -DF d\tau \frac{dc}{dn}.$$

Знак минус связан с уменьшением градиента концентраций dc/dn по длине пути диффузии.

Коэффициент молекулярной диффузии D показывает, какое количество вещества диффундирует в единицу времени через единицу поверхности при градиенте концентраций, равном единице. Коэффициент молекулярной диффузии D является аналогом коэффициента температуропроводности α .

Коэффициент D находят по справочникам или рассчитывают. Например, для газов

$$D_z = \frac{0,0435 T^{3/2}}{P \left(V_A^{1/2} + V_B^{1/2} \right)^2} \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}},$$

для жидкостей

$$D_{ж} = \frac{8,2 \cdot 10^{-6}}{\mu V_A^{1/3}} \left[1 + \left(\frac{3V_B}{V_A} \right)^{2/3} \right],$$

где T – абсолютная температура, K ; P – давление, $Па$; V_A и V_B – молярные объёмы взаимодействующих веществ, $см^3/моль$; M_A и M_B – молярные массы, $кг/моль$; μ – вязкость жидкости, в которой происходит диффузия, $Па \cdot с$.

Коэффициент диффузии газа в среду другого газа имеют значения $(0,1-1,0) \cdot 10^{-4} м^2/с$, а при диффузии газа в жидкости они в $10^4 - 10^5$ раз меньше. Таким образом, молекулярная диффузия является весьма продолжительным процессом, особенно в жидкостях, а тем более в твёрдых телах.

Строго говоря, движущей силой процесса молекулярной диффузии является градиент химического потенциала вещества (под химическим потенциалом, как известно, понимают частные производные характеристических функций по числам молей компонентов N_i при всех других постоянных параметрах состояния, например, $\partial i / \partial N_i = \mu_i = \partial U / \partial N_i = \partial G / \partial N_i$, где i – энтальпия, U – внутренняя энергия, G – энергия Гиббса). Но для случая переноса одного компонента $\mu_i = f(c_i)$, где c_i – концентрация i -го компонента в смеси. Тогда в качестве движущей силы можно использовать градиент концентраций, что намного упрощает расчёт. При невысоких концентрациях компонентов в реальных системах также можно использовать градиент концентраций в качестве движущей силы. Для достаточно концентрированных реальных систем при использовании в качестве движущей сил градиента концентраций следует учитывать влияние на величину коэффициента молекулярной диффузии состава системы (разделяемой смеси).

Для вывода дифференциального уравнения молекулярной диффузии (второго закона Фика) в неподвижной среде или в движущемся ламинарном потоке выделим элементарный параллелепипед с рёбрами dx , dy , dz (рисунок 11.3). Через каждую из элементарных площадок за время $d\tau$ в параллелепипед входят количества вещества M_x , M_y , M_z . Через противоположные грани выходят количества вещества, соответственно равные M_{x+dx} , M_{y+dy} , M_{z+dz} .

Таким образом, рассматриваемый элементарный объём за время $d\tau$ приобретает диффундирующего вещества в количестве

$$dM = (M_x - M_{x+dx}) + (M_y - M_{y+dy}) + (M_z - M_{z+dz}).$$

При этом концентрация диффундируемого вещества в направлении осей координат изменяется в интервале от C соответственно до

$$C + \frac{dc}{dx} dx; \quad C + \frac{dc}{dy} dy; \quad C + \frac{dc}{dz} dz.$$

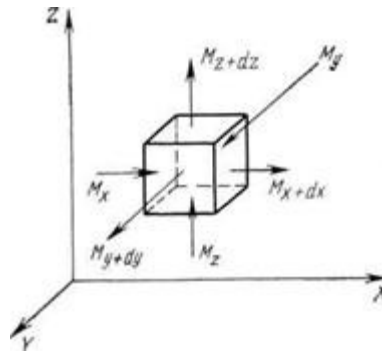


Рисунок 11.3 – К выводу дифференциального уравнения молекулярной диффузии

Согласно первому закону Фика для оси x можно записать:

$$M_x = -D \frac{dC}{dx} dydzd\tau;$$

$$M_{x+dx} = -D \frac{d\left(C + \frac{dC}{dx} dx\right)}{dx} dydzd\tau =$$

$$= -D \frac{dC}{dx} dydzd\tau - D \frac{d^2C}{dx^2} dx dydzd\tau.$$

Следовательно,

$$M_x - M_{x+dx} = -D \frac{dC}{dx} dydzd\tau + D \frac{dC}{dx} dydzd\tau + D \frac{d^2C}{dx^2} dx dydzd\tau = D \frac{d^2C}{dx^2} dx dydzd\tau \quad 18.18$$

По аналогии для других осей легко получить

$$M_y - M_{y+dy} = D \frac{d^2C}{dy^2} dx dydzd\tau;$$

$$M_z - M_{z+dz} = D \frac{d^2C}{dz^2} dx dydzd\tau \quad 18.19$$

Сложение правых частей уравнений (18.18) и (18.19) в соответствии с приведённым уравнением (18.16) позволяет получить

$$dM = D \left(\frac{d^2C}{dx^2} + \frac{d^2C}{dy^2} + \frac{d^2C}{dz^2} \right) dx dydzd\tau \quad 18.20$$

Процесс диффузии происходит во времени. Так, за период $\frac{d\tau}{d\tau}$ концентрация диффундирующего вещества в элементарном параллелепипеде изменится на $\frac{dC}{d\tau} d\tau$. Следовательно, прирост количества диффундирующего вещества в элементарном объёме можно определить как произведение объёма элементарного параллелепипеда на изменение концентрации за время

$$dM = dx dydz \frac{dC}{d\tau} d\tau \quad 18.21$$

Приравнивая правые части уравнений (18.20 и 11.21), легко получить

$$\frac{dC}{d\tau} = D \left(\frac{d^2 C}{dx^2} + \frac{d^2 C}{dy^2} + \frac{d^2 C}{dz^2} \right) \quad 18.22$$

Уравнение (18.22) представляет собой математическое выражение второго закона Фика, и выражает в общем виде распределение концентрации компонента в неподвижной среде молекулярной диффузией.

1. Какие процессы называются массообменными? Какие признаки объединяют все массообменные процессы?
2. Охарактеризуйте основные массообменные процессы, применяемые в пищевой промышленности.
3. В каком направлении, за счёт чего и до какого предела протекают массообменные процессы?
4. Приведите примеры аналогий массопередачи, теплопередачи. Чем отличаются эти процессы?
5. Составьте уравнение материального баланса массообменного процесса по всему веществу и по распределяемому компоненту.
6. Что характеризуют рабочая и равновесная линии процесса? Как определить направление массопередачи?
4. Какой закон описывает перенос вещества из ядра потока к поверхности раздела фаз? От чего зависит коэффициент молекулярной диффузии, его физический смысл?
8. Раскройте физический смысл коэффициента массопередачи.
9. Приведите второй закон Фика и объясните его физический смысл.

Тема 9. Процессы сушки сырья и продуктов

Цель занятия: изучение процессов и аппаратов сушки пищевого сырья и продуктов.

Задачами занятия является освоение:

1. Теории процессов и аппаратов для сушки пищевого сырья и продуктов.
2. Выполнение расчетов отдельных показателей по заданию преподавателя.

Формируемые компетенции

Код	Формулировка:
ОПК-3	способен использовать знания инженерных процессов при решении профессиональных задач и эксплуатации современного технологического оборудования и приборов
ПК-5	способностью проводить проектные расчеты, обосновывать и осуществлять технологические компоновки, подбор оборудования для производственных технологических линий, основных и вспомогательных помещений, в том числе с использованием информационных технологий

Теоретическая часть

(При этой части необходимо также использовать соответствующую тему из ЭКЛ)

Классификация сушилок

В пищевой промышленности применяются разнообразные сушилки, так же как и разнообразные материалы, которые подвергаются сушке. Классификация сушилок может быть произведена на основе различных признаков:

Классифицирующий признак	Типы сушилок
Режим работы	Периодического и непрерывного действия
Способ подвода тепла	Кондуктивные, радиационные, конвективные и высокочастотные
Род сушильного агента	Воздушные, с применением топочных газов, перегретого пара
Давление в сушильной камере	Атмосферные, вакуумные, глубоковакуумные
Варианты сушильного процесса	С нормальным процессом, с подогревом внутри камеры и промежуточным подогревом, с возвратом отработанного воздуха и др.
Циркуляции сушильного агента	С естественной и принудительной циркуляцией
Конструкция	Камерные, шахтные, ленточные, барабанные, трубчатые, коридорные, распылительные и др.
Направления потока материала и сушильного агента	Противоточные, прямоточные, с перекрёстным потоком

Выбор сушильного агента проводится на основе комплексного исследования технико-экономических показателей сушильной установки, технологической схемы и связи её с тепловой схемой предприятия.

Воздух как сушильный агент применяется наиболее часто в тех случаях, когда температура суши не превышает 500°C , а присутствие кислорода в нём не влияет на свойства сушимого материала. Как правило, воздух подогревается водяным паром давлением $0,3-0,7\text{ МПа}$ в паровых калориферах. Оптимальная температура воздуха при таком способе нагрева не превышает $110-150^{\circ}\text{C}$. Более высокий подогрев воздуха вызывает неоправданное удорожание всей системы суши. Для подогрева воздуха целесообразно использовать пар низких параметров (из отборов турбин, систем испарительного охлаждения, после паровых приводов, из котельных, в которых сжигают некондиционное топливо).

Топочные (дымовые) газы используются для суши материалов при высокой температуре ($200-800^{\circ}\text{C}$), причём только в тех случаях, когда газовые и твёрдые компоненты дыма не оказывают существенного влияния на качественные показатели продукта. Для их получения сооружаются специальные топочные устройства, в которых сжигают природный и другие горючие газы, жидкое топливо, отходы технологического производства (древесная стружка, солома, подсолнечная лузга и пр.). Наиболее рационально для сушилок использовать дымовые газы из топок производственных котельных, из котлов ТЭС, нагревательных, плавильных и обжиговых печей.

Азот как сушильный агент применяется в тех случаях, когда высушиваемый материал склонен подвергаться окислению или является взрывоопасным или взрывоопасна испаряющаяся из материала жидкость. Получают азот в специальных воздухоразделительных установках.

Для сушки многих капиллярно-пористых тел, материалов, накапливающих электростатические заряды, целесообразно применять в качестве сушильного агента перегретый водяной пар или перегретый пар удаляемого из материала растворителя. Перегретый пар как сушильный агент имеет в ряде случаев и другие технико-экономические преимущества перед воздухом и дымовыми газами и в последнее время находит более частое применение. К его достоинствам относятся: существенная интенсификация внутреннего теплообмена, отсутствие в высушиваемом материале окислительных процессов, упрощение тепловой схемы теплоснабжения сушильного агрегата, в ряде случаев – увеличение скорости сушки и снижение удельных расходов теплоты на сушку.

12.2 Способы сушки пищевых продуктов

Методы сушки различаются способами подвода теплоты. В сушильной технике применяются конвективный, кондуктивный (либо контактный), термоизлучением (при помощи инфракрасных лучей) и токами высокой и сверхвысокой частоты.

Конвективный способ сушки материалов получил широкое распространение. Сушильный агент (нагретый воздух, перегретый пар либо смесь топочных газов) выполняет функции теплоносителя и влагопоглотителя. Простота, возможность регулирования температуры материала – преимущества этого метода. Но при этом способе градиент температуры направлен в сторону, противоположную градиенту влагосодержания, что тормозит удаление влаги из материала.

Другим недостатком конвективного способа сушки являются относительно небольшие величины коэффициента теплоотдачи от сушильного агента к поверхности материала $[11,6 - 23,2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})]$.

Возможности интенсификации конвективной сушки связаны с увеличением теплообмена между материалом и сушильным агентом путём повышения скорости и температуры сушильного агента либо уменьшения размера частиц.

Сушка материалов в неподвижном слое осуществляется в камерных, ленточных конвейерных, тоннельных и шахтных сушильных установках.

Тоннельные сушильные установки используют для сушки плодов. Для их установки характерны простота конструкции, надёжность в работе. Применение смеси топочных газов с воздухом в них хотя и экономично, но существует опасность возникновения канцерогенных веществ. В связи с этим в современных тоннельных сушильных установках заменена система подготовки сушильного агента. Вместо смеси топочных газов и воздуха применяют воздух, нагретый в огневых калориферах без непосредственного контакта с топочными газами. Теплообмен между воздухом и продуктами сгорания топлива в огневых калориферах – через металлические стенки.

Основной недостаток тоннельных сушильных установок – параллельное движение воздуха и материала, что значительно уменьшает контакт и теплообмен между ними. Так, по сравнению с пронизыванием слоя материала нагретым воздухом теплообмен в тоннельных сушильных установках приблизительно вдвое меньше, а продолжительность сушки, например, яблок, в *3–4 раза* больше, чем в ленточных конвейерных сушильных установках. Кроме того, обслуживание тоннельных сушилок требует больших затрат ручного труда на загрузку и выгрузку материала на сита и тележки.

Шахтные сушильные установки типов ВИС-2 и ВИС-42 с опрокидывающимися полками обеспечивают непрерывность процесса сушки. Однако продолжительность сушки пищевых материалов в этих аппаратах в *2–3 раза* выше, чем в ленточных конвейерных сушильных установках.

Наиболее совершенные из них – ленточные конвейерные сушильные установки, обеспечивающие непрерывность процесса сушки.

Однако они также имеют существенные недостатки:

1_ограниченная скорость и неравномерное распределение воздуха приводят к неравномерному распределению тепла и влаги, к возможным местным перегревам материала.

Поэтому температура нагретого воздуха при сушке картофеля, овощей и плодов на этих установках не должна превышать 80°C из-за возможного подгорания продукта. Это, в свою очередь, заставляет работать на малых удельных нагрузках материала – от 5 до 16 кг/м^2 , что увеличивает продолжительность сушки и снижает производительность сушильной установки.

Интенсификация сушки пищевых материалов во взвешенном слое объясняется гидродинамикой процесса. Сушка во взвешенном слое осуществляется в аппаратах кипящего (псевдоожиженного) и фонтанирующего слоя. Кипящий слой образуется в камере постоянного сечения, фонтанирующий – в каналах переменного сечения с постепенным расширением по ходу движения сушильного агента. В связи с этим в кипящем слое скорость воздуха в верхней части камеры выше, чем внизу, из-за стремления воздуха к расширению, и движение частиц материала начинается в верхней части слоя. При постепенном расширении канала по ходу движения воздуха в фонтанирующем слое максимальная скорость его будет в нижней части слоя, и отсюда начинается движение частиц, что исключает их слеживание.

Взвешенный слой характеризуется непрерывным хаотическим движением и перемешиванием частиц в определённом объёме по высоте, высокоразвитой поверхностью соприкосновения материала с нагретым воздухом, так как при этом способе сушки каждая частица равномерно омывается потоком нагретого воздуха со всех сторон. Это приводит к равномерному нагреву материала и срыву пограничного слоя испаряющейся влаги, что позволяет применять повышенные температуры нагретого воздуха до $110-180^{\circ}\text{C}$ в зависимости от вида материала. В результате значительно сокращается продолжительность сушки, уменьшается воздействие теплоты на продукт, увеличивается удельная нагрузка материала, лучше сохраняются свойства продукта, чем при низкотемпературной сушке в неподвижном слое.

Начальная фаза кипящего слоя не обеспечивает движения и полного перемешивания всех частиц, поэтому сушку проводят в развитой стадии кипящего слоя, при котором высота слоя движущихся частиц вдвое превышает начальную высоту неподвижного материала.

Режимы фонтанирующего слоя характеризуются начальной фазой фонтанирования при скорости воздуха $v_{\text{н.ф}}$ и устойчивым фонтанированием – $v_{\text{у.ф}}$. Гидравлическое сопротивление слоя в состоянии устойчивого фонтанирования составляет 12–30% величины удельной нагрузки материала по отношению к площади поперечного сечения слоя, не зависит от вида материала, формы и размера частиц, является величиной постоянной для камеры данной конструкции и определяется углом конусности.

Виброкипящий слой образуется либо под воздействием только вибрационных колебаний, либо при совместном воздействии вибрационных колебаний и скорости воздуха. В первом случае теплоподвод осуществляется инфракрасными лучами либо контактным способом, второй случай относится к конвективному методу сушки.

Рекомендуемые параметры вибрации: частота $40-60 \text{ Гц}$, амплитуда $2-10 \text{ мм}$. П. Г. Романков и Н. Б. Рашковская рекомендуют пределы ускорения вибрации, равные $(2-3)g$ (g – ускорение свободного падения, м/с^2). Вибрация передаётся рабочей сетке, лотку, виброжёлобу либо всей сушильной камере от специальных вибраторов: механических типа виброгрохотов, пневматических, электромагнитных. Элементы, подвергаемые вибрации, находятся под углом $8-10^{\circ}$, упруго подвешены к соответствующим витым пружинам, рессорам, упругим подвескам из резины.

Сушильные установки виброкипящего слоя компактны, обеспечивают хорошее перемешивание, турбулизацию пограничного слоя и транспортировку материала. В этих установках нет уноса материала, длительность пребывания материала в сушильной установке регулируют, изменяя высоту порога в конце жёлоба.

Пневматическая сушка используется при обезвоживании мелкодисперсных материалов при удалении главным образом поверхностной влаги. Скорость движения воздуха в аппаратах приблизительно вдвое больше скорости витания частиц. Пневматические трубы-сушилки прямоточные, что позволяет применять высокие температуры сушильного агента. В пневматических трубах-сушилках сушка продолжается несколько секунд, в них больше 50% всей влаги удаляется в начале процесса на разгонном участке длиной 10–15 м. Эффект пневматической сушки достигается рециркуляцией (ретуром) подсушенного материала и смешиванием его с влажным материалом.

Применяют сушилки различных конструкций для увеличения количества испаренной влаги при небольшой высоте аппарата – типа «труба в трубе», «серпантин» спирального типа, двухступенчатые с рециркуляцией материала и сушильного агента. В пневмосопловых сушилках ряда зарубежных фирм на начальном участке установлена труба Вентури.

Пневматические сушилки снабжают повторными измельчителями (дезинтеграторами). Эффективными являются пневмосушилки с несколькими расширителями, позволяющими сочетать пневматический и фонтанирующий слой для полидисперсных материалов, в которых более крупные частицы высушиваются, задерживаясь в расширителях.

К разновидностям пневматических сушильных установок относятся вихревые сушильные аппараты с тангенциальным вводом влажного материала. В аппарате образуется вращающееся циркулирующее кольцо толщиной 100–150 мм. В зависимости от размера частиц пребывание их в камере длится 2–3 мин. Спиральные пневматические сушильные аппараты изготовлены в виде плоской бифилярной спирали в вертикальной плоскости. Влажный материал с нагретым газом в сушильной камере проходит от входного патрубка к центру камеры и от центра к периферии и к выходному патрубку.

Распылительная сушка получила распространение при производстве сухого молока и молочных продуктов, сухих молочных смесей детского питания, сухой крови, быстрорастворимого кофе, является перспективной при производстве овощных и фруктово-ягодных порошков. Этот метод позволяет значительно интенсифицировать процесс за счёт максимального уменьшения размера частиц. В этих установках создается огромная поверхность испарения мелкодиспергированных капель раствора, поэтому используют повышенные температуры сушильного агента (до 200 °C) при сушке термолабильных пищевых материалов. На процесс испарения затрачивается большое количество теплоты, и температура материала регулируется по температуре уходящего воздуха (70–80 °C). Невысокая температура материала и быстрая сушка (несколько секунд) позволяют получить сухой порошок практически с полным сохранением питательных и биологически активных веществ.

В качестве воздухоподогревателей применяют паровые калориферы различной конструкции: пластинчатые, ребристые, из стальных труб с приваренными прямоугольными пластинками, шайбовые с приваренными к трубам шайбами или с навитой на трубах металлической лентой. В калориферы пар подают под давлением 0,8–1,6 МПа.

Нагретый в подогревателях до 160–200 °C воздух поступает в сушильную камеру. Чаще всего она имеет форму цилиндра с плоским или коническим основанием, реже – прямоугольника с двускатным дном. На металлическом (из профильной стали) или железобетонном каркасе закреплены двойные стенки: внутренняя из листовой нержавеющей стали либо метлахской плитки, наружная – из листовой стали. Между внутренней и наружной стенками проложена тепловая

изоляция, обычно на основе стекловолокна. Температура внутренних стенок сушильной камеры не должна охлаждаться ниже точки росы во избежание оседания на стенках сухого порошка. Размер камеры зависит от производительности установки: диаметр $2600-12500 \text{ мм}$, высота $3000-25000 \text{ мм}$ и более. Корпус в больших камерах выполнен из отдельных царг, установленных в ярус и скреплённых болтами. Каждая царга состоит из щитков, каркасы которых сварены из профильной стали.

Внутренняя поверхность сушильной камеры должна быть ровной, гладкой, без выступов и щелей. В сушильной камере расположены распылительные устройства трёх видов: форсунки механические, пневматические и центробежные диски.

Движение распыленных частиц раствора и воздуха в камере может быть прямоточным, противоточным и смешанным. При сушке термолабильных материалов, в том числе молочных продуктов, предпочтительно прямоточное движение воздуха и частиц, так как оно позволяет применять более высокие температуры воздуха без опасности перегрева материала. Возможны верхняя и нижняя прямоточные подачи воздуха и раствора. При нижней подаче скорость воздуха в камере должна быть выше скорости витания наиболее крупных частиц материала.

Кондуктивный способ сушки материалов. Вальцовые сушилки

Кондуктивный способ сушки материалов основывается на передаче тепла материалу при соприкосновении с горячей поверхностью. Воздух служит только для удаления водяного пара из сушилки, являясь влагопоглотителем. Коэффициент теплоотдачи при этом способе значительно выше, чем при конвективной сушке, и составляет $170-180 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Контактная сушка пищевых материалов имеет ограниченное применение.

На кондуктивном способе сушки основаны вальцовые сушильные установки. Он отличается высокой интенсивностью и экономичностью – на 1 кг испаренной влаги затрачивается всего $1,3-1,4 \text{ кг}$ пара.

Продолжительность вальцовой сушки определяется уравнением

$$\tau = \frac{\varphi}{\omega} = \frac{30l}{\pi n R},$$

где φ – угол, пройденный частицей высушиваемого материала за время сушки, рад ; ω – угловая скорость движения вальцов, с^{-1} ; l – длина пути, пройденного высушиваемой частицей по окружности вальца, м ; n – частота вращения вальца, мин^{-1} ; R – радиус вальца, м .

Толщина плёнки сухого продукта при условии, что ширина плёнки равна длине вальца двухвальцовой сушильной установки:

$$\delta = \frac{M_1}{120 \rho_m n l L}, \quad 12.2$$

где M_1 – количество поступающего сгущённого материала, $\text{кг}/\text{ч}$; ρ_m – плотность сгущённого материала, $\text{кг}/\text{м}^3$; L – длина вальца, м .

Мощность, требуемая для вращения вальцов и срезания сухой плёнки,

$$N = \frac{p L_n (1 + \mu g \alpha)}{102 \eta}, \quad 12.3$$

где p – сила, необходимая для снятия плёнки шириной 1 см , N (для обезжиренного молока $p = 3,5-4,5 \text{ Н}$); L_n – общая длина ножей, см ; μ – коэффициент трения между ножами и по-

верхностями вальцов (для стали по чугуна $\mu = 0,18$); α – угол наклона ножа (угол между ножом и касательной к окружности вальца, проведенной в точке прикосновения ножа к вальцу),

Терморadiационная сушка (ИК-сушка)

Скорость сушки инфракрасными лучами увеличивается по сравнению с конвективной, но не пропорционально росту теплового потока. Так, для плодов и овощей скорость сушки инфракрасными лучами на 25–95% выше по сравнению с интенсифицированными методами конвективной сушки. Это можно объяснить тем, что скорость сушки зависит не столько от скорости передачи тепла, сколько от скорости перемещения влаги внутри материала. Для сохранения высушиваемого продукта не рекомендуется применять мощные потоки термоизлучения.

Для интенсификации терморadiационной сушки необходимо, чтобы ИК-лучи проникали в материал на возможно большую глубину. Это зависит как от пропускной способности материала, так и от длины волны ИК-лучей. Чем она меньше, тем выше проникающая способность инфракрасных лучей. Проницаемость пищевых растительных материалов увеличивается с уменьшением толщины слоя и с понижением влажности материала. Так, проницаемость ИК-лучей в сырой картофель достигает 6 мм, в сухой – 15–18 мм.

При сушке ИК-лучами возникают перепады температур, под действием которых влага перемещается по направлению теплового потока внутрь материала. Кроме того, она частично испаряется с поверхности, в результате происходит возрастание градиента влагосодержания, величина которого превышает градиент температур, и влага начинает перемещаться к наружной поверхности. Таким образом, градиент температуры оказывает тормозящее действие на перемещение влаги.

По характеру излучателей различают терморadiационные сушилки с электрическим и газовым обогревом. Сушилки с электрическим обогревом компактны, просты в обращении и эксплуатации, безынерционны. Однако высокий расход электроэнергии и неравномерность сушки ограничивают их применение.

Терморadiационные сушилки с газовыми панельными излучателями более экономичны и обеспечивают более равномерную сушку, чем сушилки с электрообогревом.

Сушка токами высокой и сверхвысокой частоты основана на том, что диэлектрические свойства воды и сухих веществ пищевых продуктов различаются: влажный материал значительно быстрее нагревается, чем сухой. В процессе сушки с применением токов высокой и сверхвысокой частоты температура более влажных внутренних слоев выше, чем наружных, более обезвоженных.

При сушке органический материал помещают между обкладками конденсатора, к которым подается ток высокой или сверхвысокой частоты. Обкладки имеют противоположные заряды, причём эти заряды меняются. Электроны и ионы изменяют направление движения, в результате возникает трение с выделением теплоты. Диполи несимметричной формы приходят в колебания, при этом возникает молекулярное трение и выделяется теплота. Для полярных молекул, состоящих из упругих диполей, кроме изменения ориентации, возможны и смещения одних молекул относительно других. Возникающий при этом эффект деформации также сопровождается выделением тепла за счёт трения. Энергия электромагнитных волн, затрачиваемая на продолжение этих трений, переходит в теплоту.

Под действием переменного электрического поля высокой частоты происходит регулируемый нагрев материала. Вследствие испарения влаги, теплообмена с окружающей средой поверхностные слои материала сильнее обезвоживаются и больше отдают теплоты, чем при кондуктивном и конвективном способах сушки. В связи с этим температура и влажность внутри материала выше, чем снаружи. Возникают градиенты влагосодержания и температуры, под действием которых влага изнутри перемещается к поверхности. При этом в отличие от конвективной сушки направление обоих градиентов совпадает, что интенсифицирует процесс сушки.

При сушке токами высокой и сверхвысокой частоты испарение происходит во всём объёме тела и внутри частицы возникает градиент давления, ускоряющий перенос влаги. Изменяя напряжённость поля, можно плавно регулировать температуру материала при сушке.

Чем ниже диэлектрическая проницаемость, тем на большую глубину материала проникают электромагнитные колебания токов сверхвысокой частоты.

Угол диэлектрических потерь δ — мера превращения в теплоту энергии электромагнитного поля токов высокой и сверхвысокой частоты. С увеличением $\operatorname{tg} \delta$ возрастает выделение тепла при обработке материала этими токами.

Преимущества сушки токами высокой и сверхвысокой частоты по сравнению с конвективной и контактной сушкой — возможность регулирования и поддержания определённой температуры материала и значительная интенсификация процесса обезвоживания, улучшение качества сушеных продуктов.

В последние годы сушка токами высокой частоты практически не применяется в промышленности из-за низких КПД ламповых и машинных генераторов, больших затрат электроэнергии (от 2,5 до 5 кВт·ч на 1 кг влаги).

Все большее распространение в сушильной технике получает применение токов сверхвысокой частоты. КПД современных генераторов таких токов — магнетронов и клистронов — от 0,55 до 0,7, затраты электроэнергии 1,2 кВт на 1 кг испаренной влаги.

Сублимационная сушка представляет собой сушку пищевых продуктов в замороженном состоянии в условиях глубокого вакуума.

При сублимационной сушке отсутствует контакт материала с кислородом воздуха. Основное количество влаги (75–90%) удаляется при сублимации льда при температуре продукта ниже 0°C , и только удаление остаточной влаги происходит при нагреве материала до $40–60^{\circ}\text{C}$. Продукты сублимационной сушки отличаются высоким качеством, сохраняют питательные вещества, обладают повышенной восстанавливающей способностью, имеют незначительную усадку, сохраняют цвет, имеют пористое строение. С точки зрения сохранения качества, сублимационная сушка является наиболее совершенной из всех способов сушки.

Первой технологической операцией при сублимационной сушке, является замораживание материала. Применяют либо быстрое предварительное замораживание в морозильных камерах, либо самозамораживание (пастообразных материалов и некоторых видов фруктов и овощей) в сублиматоре.

В процессе самозамораживания из материала испаряется 10–15% всей влаги за счёт выделения теплоты плавления льда при замерзании воды. Образование кристаллов льда происходит постепенно путём углубления зоны кристаллизации. Окончание самозамораживания определяют конкретно для каждого вида материала при достижении температуры в середине частицы от -5 до -20°C . Продолжительность самозамораживания 10–15 мин. При повышении длительности этого процесса возможно образование слишком крупных кристаллов льда, которые могут разрушить клетки ткани и ухудшить качество продукта.

Предварительное замораживание проводят для жидких продуктов во избежание их вспенивания, а также для ряда кусковых материалов во избежание образования плотной корки, замедляющей последующую сушку. Замораживание ведут при температуре на несколько градусов ниже температуры сублимации, чтобы исключить оттаивание во время загрузки материала в сублиматор и при создании разрежения.

Второй период (сублимация) характеризуется постоянной скоростью сушки материала. В это время удаляется основная масса влаги (до 60% и более), происходит сублимация льда путём постепенного углубления зоны испарения. Чем больше влаги удаляется в этот период, тем лучше сохраняются свойства сырья.

В периоде сублимации появляется температурный градиент по толще материала. По мере сублимации льда, когда из него удалилась влага, вначале повышается температура поверхностного слоя, затем происходит повышение температуры последующих слоев. После испарения всего льда температура материала повышается, становится выше нуля, приближаясь к температуре окружающей среды.

Продолжительность периода постоянной скорости сушки зависит от:

- величины остаточного давления в сублиматоре,
- интенсивности подвода тепла,
- температуры материала и поверхности конденсации, скорости удаления паровоздушной смеси. Интенсивность сушки в этом периоде приблизительно равна интенсивности испарения.

Третий период удаления остаточной влаги характеризуется падающей скоростью сушки. К началу этого времени в основном заканчивается сублимация льда и температура материала становится положительной. В этот период удаляется связанная влага, не замерзшая в материале.

Скорость сушки зависит от интенсивности подвода тепла в углублённую зону испарения и удаления пара из зоны испарения через высохшие слои к поверхности материала. На интенсивность испарения влияют структура, пористость высушенного материала, форма, размер и толщина частиц и др. Скорость сушки постепенно снижается, а температура материала постепенно увеличивается до температуры окружающей среды. В этот период удаляется $10-20\%$ всей влаги.

Температура поверхности конденсаторов должна быть на $10-15^{\circ}\text{C}$ ниже температуры замораживания материалов, чтобы обеспечить достаточную разность давлений для быстрого удаления сублимированного пара.

В качестве теплоносителей при сублимационной сушке продуктов применяют глицерин, трихлорэтилен, этиленгликоль и др.

Контрольные вопросы

1. Перечислите вид классификации сушилок.
2. В чём состоит сущность конвективной, контактной, радиационной, сублимационной и диэлектрической сушки? В каких случаях целесообразно применять тот или иной вид сушки?
3. Какие теплоносители используются в сушильных установках? Охарактеризуйте их.
4. Опишите устройство, раскройте принцип действия камерных и туннельных сушилок. Дайте их сравнительную характеристику.
5. Опишите устройство, раскройте принцип действия барабанных сушилок. Перечислите области их применения. Опишите устройство различных внутренних насадок барабанных сушилок.
6. Опишите устройство, раскройте принцип действия ленточных сушилок. Перечислите области их применения.
4. Опишите устройство, раскройте принцип действия с псевдоожиженным слоем и распылительных сушилок. Дайте их сравнительную характеристику.
8. Опишите устройство контактных сушилок.
9. Охарактеризуйте специальные виды сушки – радиационную, сублимационную, СВЧ-сушку. Перечислите области их применения.

Литература

Перечень основной литературы

1. Гнездилова, А. И. Процессы и аппараты пищевых производств : учебник и практикум для вузов / А. И. Гнездилова. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2025. — 259 с.

Перечень дополнительной литературы

1. Бакин, И.А. Процессы и аппараты пищевых производств : учебное пособие / И.А. Бакин .- Москва ; Вологда : Инфа-Инженерия , 2023 .- 208 с.
- 2.Омаров М. С. О-57 Процессы и аппараты пищевых производств : учебное пособие для студентов пищевых и биотехнологических специальностей / М. С. Омаров. – Павлодар : Кереку, 2010. – 169 с.
3. Плаксин, Ю. М. Процессы и аппараты пищевых производств : учебник / Ю. М. Плаксин, Н. Н. Малахов, В. А. Ларин. - 2-е изд, перераб. и доп. - М.: КолосС, 2005. - 760 с4. Вобликова Т. В., Шлыков С. Н. , Пермяков А. В. Процессы и аппараты пищевых производств: учебное пособие Ставрополь: Агрус, 2016, 212 с.
5. Процессы и аппараты пищевых производств : учебник / А. Н. Остриков [и др.] ; ред. А. Н. Остриков. - СПб. : ГИОРД, 2012. - 616 с. : ил. - УМО. - Библиогр.: с. 613.
6. Холодилин, А. Лабораторный практикум по курсу «Процессы и аппараты пищевых производств» : учебное пособие / А. Холодилин, С.Ю. Соловых ; Министерство образования и науки Российской Федерации. - 2-е изд. - Оренбург : ОГУ, 2014. - 142 с.

Методические указания по организации и проведению самостоятельной работы
по дисциплине
«Процессы и аппараты пищевых производств»
для студентов по направлению подготовки 43.03.01 - Сервис, направленность
(профиль) - Гастрономия и сервис

Ставрополь, 2026

Методические рекомендации разработаны для организации самостоятельной работы студентов по направлению подготовки 43.03.01 - Сервис, направленность (профиль) - Гастрономия и сервис.

Методические рекомендации содержат:

- общую характеристику самостоятельной работы студента при изучении дисциплины, включающую цель и задачи каждого вида самостоятельной работы студента, предусмотренного учебным планом и рабочей программой дисциплины, формируемые данным видом деятельности компетенции и методические рекомендации по изучению теоретического материала;
- рекомендации по организации работы с литературой.

Составитель: доц., д.т.н. А.А. Борисенко

Рецензент: проф., д.т.н. С.П. Бабенышев

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 Общая характеристика самостоятельной работы.....	5
2 Цель и задачи работы.....	5

<u>3</u> Виды самостоятельной работы.....	5
<u>4. Методические рекомендации по изучению теоретического материала.....</u>	6
<u>5. Методические указания по видам работ, предусмотренных рабочей программой</u>	8
<u>Список рекомендуемой литературы.....</u>	9

ВВЕДЕНИЕ

Освоение программы дисциплины предполагает освоение теоретических знаний и формирование навыков их практического применения.

Самостоятельная работа студентов – важнейшая составная часть занятий, необходимая для полного усвоения программы курса.

Целью самостоятельной работы является закрепление и углубление знаний, полученных студентами на лекциях, подготовке к промежуточным формам контроля знаний и к итоговому контролю.

Дидактические цели самостоятельных занятий:

- формирование профессиональных умений;
- формирование умений и навыков самостоятельного умственного труда;
- мотивирование регулярной целенаправленной работы по освоению дисциплины;
- развитие самостоятельности мышления;
- формирование убежденности, волевых черт характера, способности к самоорганизации.

Методическое обеспечение самостоятельной работы дисциплине состоит из:

- определения учебных вопросов, которые студенты должны изучить самостоятельно;
- подбора необходимой учебной литературы, обязательной для проработки и изучения;
- поиска дополнительной научной литературы, к которой студенты могут обращаться по желанию, если у них возникает интерес в данной теме;
- определения контрольных вопросов, позволяющих студентам самостоятельно проверить качество полученных знаний;
- организации консультаций преподавателя со студентами для разъяснения вопросов, вызвавших у студентов затруднения при самостоятельном освоении учебного материала.

Самостоятельная работа студента – это особым образом организованная деятельность, включающая в свою структуру такие компоненты, как: уяснение цели и поставленной учебной задачи; четкое и системное планирование самостоятельной работы; поиск необходимой учебной и научной информации; освоение собственной информации и ее логическая переработка; проведение самоанализа и самоконтроля.

Основные виды самостоятельных работ по учебной дисциплине:

работа с понятийным аппаратом; поисковая работа с различными источниками; составление аннотированного списка литературы по проблеме.

Контроль знаний студентов включает формы итогового контроля.

1 Общая характеристика самостоятельной работы

Целью изучения дисциплины «Процессы и аппараты пищевых производств» является формирование профессиональных компетенций в соответствии с требованиями ФГОС ВО.

Задачи дисциплины состоят в изучении на базе фундаментальных законов физики и химии общих процессов, протекающих в различных пищевых производствах, изучении современных аппаратов, общих методов их расчёта, путей рационализации процессов, выбора оптимальных конструкций аппаратов в конкретных производствах, в освещении основных технических проблем, научных достижений

и современных тенденций использования новых физических методов обработки пищевых продуктов в тесной взаимосвязи с вопросами технологии.

2. Цели и задачи самостоятельной работы.

Самостоятельная работа направлена на решения ряда задач, к которым относятся:

- систематизация и закрепление полученных теоретических знаний и практических умений студентов;
- углубление и расширение теоретических знаний;
- формирование умения использовать справочную литературу;
- развитие познавательных способностей и активности студентов;
- творческой инициативы, самостоятельности, ответственности и организованности;
- формирование самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации;
- развитие исследовательских умений.

Актуальность: Работа слушателя в современных условиях обуславливает необходимость изучения принципиальных подходов к изучению дисциплины. Знания, полученные в рамках изучения дисциплины необходимы на протяжении всей профессиональной деятельности.

3. Виды самостоятельной работы

Рабочей программой по дисциплине предусмотрено самостоятельное изучение материалов в т. ч. по всем темам.

При изучении материалов по каждой теме желательно составить краткий конспект наиболее важной информации.

Работа с конспектом и материалом по темам занятий..

Отметьте, который вызывает затруднения для понимания. Попытайтесь найти ответы на затруднительные вопросы, используя предлагаемую литературу. Если самостоятельно не удалось разобраться в материале, сформулируйте вопросы и обратитесь на текущей консультации или на ближайшей лекции за помощью к преподавателю.

Отводите время для повторения пройденного материала, проверяя свои знания, умения и навыки по контрольным вопросам и тестам.

Помимо самостоятельного изучения материалов по темам к самостоятельной работе студентов относится подготовка к практическим занятиям по результатам которой слушатель может быть способным к работе по темам в рамках семинар-круглый стол.

При самостоятельной подготовке слушатель :

- организует свою деятельность в соответствии с методическим руководством по выполнению практических работ;
- изучает информационные материалы;

В результате выполнения указанных видов самостоятельной работы происходит **формирование профессиональных компетенций** представленных ниже:

Код	Формулировка:
-----	---------------

ОПК-3	Способен использовать знания инженерных процессов при решении профессиональных задач и эксплуатации современного технологического оборудования и приборов
ПК-5	способностью проводить проектные расчеты, обосновывать и осуществлять технологические компоновки, подбор оборудования для производственных технологических линий, основных и вспомогательных помещений, в том числе с использованием информационных технологий

4. Методические рекомендации по изучению теоретического материала

При изучении дисциплины у студентов должен вырабатываться рационально-критический подход к изучаемым проблемам и явлениям. Это включает понимание того, что со временем ряд информационных и теоретических материалов устаревает, требуя критического отношения. С другой стороны, каждый текущий вопрос имеет свою историю, которую тоже полезно знать.

Чтобы понять содержание теоретического материала, нужно уметь его прочитывать. Начинать следует с предварительного просмотра, в ходе которого ознакомиться с названием работы, с аннотацией, оглавлением, предисловием. Часто замысел работы ясен уже при ознакомлении с ее названием. Но особенно интересен просмотр оглавления, в результате которого становится ясным развитие мысли автора. Неплохо было бы появившиеся при этом мысли зафиксировать на бумаге.

Просматривая текст оглавления, нужно остановиться на тех главах, которые представляют для вас особенный интерес, бегло ознакомиться с ними, составляя в общих чертах свое представление о них. Цель этого действия – найти места, относящиеся к искомой теме, определив при этом, что ценного в каждом из них.

Следующий этап – прочтение выделенных мест с фиксацией самых главных сведений. При этом надо четко и ясно осознавать цель чтения, постоянно держа ее перед собой: по какому вопросу нужна информация, для чего нужна, ее характер и т.д. необходимо менять режим чтения – от беглого вдумчивого – в зависимости от ценности информации, останавливаясь там, где это требуется для глубокого понимания текста.

Следует научиться определять структуру текста по соподчиненности его частей, учитывая взаимосвязь текста с рисунками, сносками, примечаниями и таблицами. Все это поможет пониманию текста при беглом ознакомлении с ним. Так вырабатывается способность при прочтении сразу понимать смысл и значение новой информации.

Многие книги и статьи имеют в своем аппарате списки литературы, которые дают возможность пополнить информационную осведомленность о дополнительной литературе по данному вопросу.

Отдельный этап прочтения – ведение записей прочитанного. Существует несколько видов записей: план, выписки, тезисы, аннотация, резюме, конспект.

Планом удобно пользоваться при подготовке к устному выступлению по выбранной теме. Каждый пункт плана должен раскрывать одну из сторон избранной темы, а весь план должен охватывать ее целиком.

Тезисы предполагают сжатое изложение основных положений текста в форме утверждения или отрицания. Они являются более совершенной формой записей и представляют основу для дискуссии. К тому же их легко запомнить.

Аннотация – краткое изложение содержания – дает общее представление о работе.

Резюме кратко характеризует выводы, главные итоги произведения.

Конспект является наиболее распространенной формой ведения записей. Основную ткань конспекта составляют тезисы, дополненные доказательствами и рассуждениями. Конспект может быть текстуальным, свободным или тематическим. Текстуальный представляет собой цитатник с сохранением логики работы и структуры текста. Свободный конспект основан на изложении материала в том порядке, который более удобен автору. В этом смысле конспект представляет собрание воедино мыслей, разбросанных по всей книге. Тематический конспект может быть составлен по нескольким источникам, где за основу берется тема, интерпретируемая по-разному.

Экономия времени дает использование при записях различного рода сокращений, аббревиатуры и т.д. многие используют для регистрации исследуемых тем систему карточек. Преимущество карточек в том, что тема там излагается очень сжато, и они очень удобны в использовании, т.к. их можно разложить на столе, перегруппировать и без труда найти искомую тему.

5. Методические указания по видам работ, предусмотренных рабочей программой

Работа на лекции является очень важным видом деятельности для изучения дисциплины, т.к. на лекции происходит не только сообщение новых знаний, но и систематизация и обобщение накопленных знаний, формирование на их основе идейных взглядов, убеждений, мировоззрения, развитие познавательных и профессиональных интересов. Лектор ориентирует студентов в действующем законодательстве Российской Федерации и соответственно в учебном материале.

Краткие записи лекций (конспектирование) помогает усвоить материал. Написание конспекта лекций: кратко, схематично, последовательно фиксировать основные положения, выводы, формулировки, обобщения; пометать важные мысли, выделять

ключевые слова, термины. Конспект лучше подразделять на пункты, параграфы, соблюдая красную строку. Принципиальные места, определения, формулы следует сопровождать замечаниями: «важно», «особо важно», «хорошо запомнить» и т.п. или подчеркивать красной ручкой. Целесообразно разработать собственную символику, сокращения слов, что позволит сконцентрировать внимание студента на важных сведениях. Прослушивание и запись лекции можно производить при помощи современных устройств (диктофон, ноутбук, нетбук и т.п.).

Работая над конспектом лекций, всегда следует использовать не только учебник, но и ту литературу, которую дополнительно рекомендовал лектор, в том числе нормативно-правовые акты соответствующей направленности. По результатам работы с конспектом лекции следует обозначить вопросы, термины, материал, который вызывают трудности, пометить и попытаться найти ответ в рекомендуемой литературе. Если самостоятельно не удастся разобраться в материале, необходимо сформулировать вопрос и задать преподавателю на консультации на практических занятиях.

Лекционный материал является базовым, с которого необходимо начать освоение соответствующего раздела или темы.

Для подготовки к итоговой аттестации необходимо выполнить практические работы, тщательно изучить и проанализировать теоретические сведения по каждому виду работ и все темы лекций.

Список рекомендуемой литературы

1. Перечень основной литературы:

1.1. Основная литература:

1. Гнездилова, А. И. Процессы и аппараты пищевых производств : учебник и практикум для вузов / А. И. Гнездилова. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2025. — 259 с.

1.2. Дополнительная литература:

1. Бакин, И.А. Процессы и аппараты пищевых производств : учебное пособие / И.А. Бакин .- Москва ; Вологда : Инфа-Инженерия , 2023 .- 208 с.

2.Омаров М. С. О-57 Процессы и аппараты пищевых производств : учебное пособие для студентов пищевых и биотехнологических специальностей / М. С. Омаров. – Павлодар : Кереку, 2010. – 169 с.

3. Плаксин, Ю. М. Процессы и аппараты пищевых производств : учебник / Ю. М. Плаксин, Н. Н. Малахов, В. А. Ларин. - 2-е изд, перераб. и доп. - М.: КолосС, 2005. - 760 с
4. Вобликова Т. В., Шлыков С. Н., Пермяков А. В. Процессы и аппараты пищевых производств: учебное пособие Ставрополь: Агрус, 2016, 212 с.
5. Процессы и аппараты пищевых производств : учебник / А. Н. Остриков [и др.] ; ред. А. Н. Остриков. - СПб. : ГИОРД, 2012. - 616 с.
6. Холодили́н, А. Лабораторный практикум по курсу «Процессы и аппараты пище- вых производств» : учебное пособие / А. Холодили́н, С.Ю. Соловых ; Министерство обра- зования и науки Российской Федерации. - 2-е изд. - Орен- бург : ОГУ, 2014. - 142 с.

1.3. Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине

1. Методические указания по выполнению практических занятий по дисциплине «Процессы и аппараты пищевых производств» для студентов очной формы обучения направления подготовки 43.03.01 - Сервис, направленность (профиль) – Гастрономия и сервис, квалификация (степень) выпускника: бакалавр / сост. А.А.Борисенко – Ставрополь: СКФУ [Электронный ресурс].
2. Методические рекомендации по организации и проведению самостоятельной работы по дисциплине «Процессы и аппараты пищевых производств» для студентов очной фор мы обучения по направлению подготовки 43.03.01 - Сервис, направленность (профиль) – Гастрономия и сервис, квалификация (степень) выпускника: бакалавр / сост. А.А.Борисенко – Ставрополь: СКФУ [Электронный ресурс].
3. Прохасько, Л.С. Процессы и аппараты пищевых производств: методические указания / Л.С. Прохасько. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2021. – 51 с.

1.4. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины

1. app.worldfood-connect.com / Сайт «Пищевая промышленность – На WorldFood Connect», [Видеообзоры стендов WorldFood](#), [кулинарный мастер-класс](#) .
2. <http://www.rsl.ru> / Электронные информационные ресурсы Российской государственной библиотеки.
3. www.biblioclub.ru / Университетская библиотека ONLINE.
4. <http://catalog.ncfu.ru> – автоматизированная информационно-библиотечная система «Фолиант»
5. <http://e.lanbook.com/> – Электронно-библиотечная система Издательство «Лань»
6. <http://mppnik.ru> – информационный портал «Пищевик».
7. <http://window.edu.ru> – единое окно доступа к образовательным ресурсам.

4. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем

При чтении лекций и проведении практических занятий используется компьютерная техника, демонстрации видео роликов и мультимедийных материалов.

Информационные справочные системы:

Информационно-справочные и информационно-правовые системы, используемые при изучении дисциплины:

- ЭБС «Университетская библиотека онлайн». <http://biblioclub.ru>
- Электронно-библиотечная система IPRbooks.

<http://www.iprbookshop.ru>

- Яндекс (<http://www.yandex.ru>),
- Rambler (<http://www.rambler.ru>),
- Google (<http://www.google.ru>),

единое окно доступа к образовательным ресурсам <http://window.edu.ru/>