



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Машины и аппараты пищевых производств»

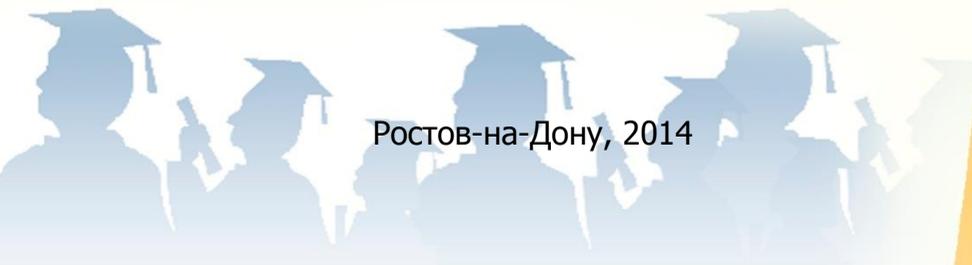
Учебное пособие

по дисциплине

«Процессы и аппараты пищевых производств»

Авторы
Ильченко В.Д.
Гучева Н.В.

Ростов-на-Дону, 2014





Аннотация

Пособие предназначено для студентов очной и заочной формы обучения по специальности 260601 Машины и аппараты пищевых производств и по направлениям 260100 Технология продуктов питания, 260100 Продукты питания из растительного сырья, 151000 Технологические машины и оборудование.

Авторы

К.т.н., профессор Ильченко Вильям Дмитриевич,
Старший преподаватель Гучева Наталья Владимировна





Оглавление

Введение	7
ЛЕКЦИЯ №1 Теоретические основы науки о процессах и аппаратах пищевых производств	8
1.1 Содержание и задачи курса ПАПП	8
1.2 Возникновение и развитие науки о процессах и аппаратах	9
1.3 Классификация основных процессов пищевой технологии	10
Контрольные вопросы и задания:	14
ЛЕКЦИЯ №2 Основные законы науки о процессах и аппаратах пищевых производств. Методы исследования	15
2.1 Основные законы науки о процессах и аппаратах.....	15
2.2 Методы исследования процессов и аппаратов	17
2.3 Метод анализа размерностей	23
Контрольные вопросы и задания:	25
ЛЕКЦИЯ №3 Моделирование и подобие процессов пищевых производств.....	26
3.1 Моделирование процессов пищевой технологии.....	26
3.2 Основные положения теории подобия	27
3.3 Теоремы подобия.....	33
Контрольные вопросы и задания:	40
ЛЕКЦИЯ №4 Основы гидравлики. Гидростатика	41
4.1 Основное уравнение гидростатики	41
4.2 Приборы для измерения давления	49
4.3 Примеры практического использования.....	53
основного уравнения гидростатики	53
Контрольные вопросы и задания:	55
ЛЕКЦИЯ №5 Основы гидравлики. Гидродинамика	57
5.1 Гидродинамика. Общие положения.....	57



Процессы и аппараты пищевых производств

5.2 Уравнения Бернулли	60
5.3 Практические приложения уравнения Бернулли	63
Контрольные вопросы и задания:	65

ЛЕКЦИЯ №6 Гидромеханические процессы. Разделение неоднородных систем66

6.1 Методы разделения неоднородных систем.....	66
6.2. Материальный баланс процессов разделения	67
6.3. Кинетика разделения неоднородных смесей.....	68
Контрольные вопросы и задания:	71

ЛЕКЦИЯ №7 Гидромеханические процессы. Отстаивание и осаждение72

7.1 Отстаивание под действием гравитационного поля .72	
7.2 Осаждение под действием центробежной силы	73
7.3 Оборудование для отстаивания и осаждения.....	75
Контрольные вопросы и задания:	83

ЛЕКЦИЯ №8 Гидромеханические процессы. Фильтрация84

8.1. Фильтрация. Общие сведения	84
8.2. Движущая сила и скорость процесса	85
8.3 Оборудование для фильтрации и его расчет	88
Контрольные вопросы и задания:	95

ЛЕКЦИЯ №9 Гидромеханические процессы. Псевдооживление96

9.1 Псевдооживление. Общие сведения.....	96
9.2. Физические основы псевдооживления и расчетные формулы	97
9.3. Аппараты с псевдооживленным слоем	102
Контрольные вопросы и задания:	105

ЛЕКЦИЯ №10 Гидромеханические процессы. Смешивание 106

10.1 Смешивание. Общие сведения	106
10.2 Смесители для сыпучих материалов.....	113



Процессы и аппараты пищевых производств

10.3 Смешивание жидких сред, пластических масс..... 114
 Контрольные вопросы и задания: 120

ЛЕКЦИЯ №11 Гидромеханические процессы. Обратный осмос и ультрафильтрация 121

11.1 Обратный осмос и ультрафильтрация. Общие сведения..... 121
 11.2 Теоретические основы разделения обратным осмосом и ультрафильтрацией..... 122
 11.3 Устройство мембранных аппаратов 125
 Контрольные вопросы и задания: 128

Лекция №12 Теплообменные процессы. Теплопередача 129

12.1 Теплопередача..... 129
 12.2 Теплопроводность..... 130
 12.3 Тепловое излучение..... 132
 12.4 Конвективный теплообмен (теплоотдача) 134
 Контрольные вопросы и задания: 141

ЛЕКЦИЯ №13 Теплообменные процессы. Нагревание, испарение, охлаждение и конденсация 142

13.1 Виды тепловых процессов. Конденсация..... 142
 13.2 Устройство теплообменной аппаратуры 147
 13.3 Подбор теплообменников..... 151
 Контрольные вопросы и задания: 152

ЛЕКЦИЯ №14 Массообменные процессы. Основы массопередачи..... 153

14.1 Общие сведения..... 153
 14.2 Кинетика массопередачи..... 154
 14.3 Основные законы массопередачи 156
 Контрольные вопросы и задания: 161

ЛЕКЦИЯ №15 Массообменные процессы. Абсорбция 162

15.1 Материальный баланс и кинетические закономерности абсорбции 162



Процессы и аппараты пищевых производств

15.2 Принципиальные схемы абсорбции	164
15.3 Конструкции абсорберов	166
Контрольные вопросы и задания:	170

ЛЕКЦИЯ №16 Массообменные процессы. Адсорбция 171

16.1 Адсорбция. Общие сведения	171
16.2 Адсорберы и схемы адсорбционных установок.....	173
16.3 Ионообменные процессы и аппараты	177
Контрольные вопросы и задания:	182

ЛЕКЦИЯ №17 Механические процессы. Измельчение и классификация твердых материалов 184

17.1 Измельчение и классификация твердых материалов.	184
17.2 Физические основы измельчения	185
17.3 Конструкция и работа основных типов измельчающих машин	188
17.4 Классификация зернистых материалов	195
Контрольные вопросы и задания:	199

ЛЕКЦИЯ №18 Механические процессы. Прессование ... 200

18.1 Обезвоживание и брикетирование	200
18. 2 Гранулирование и формование	204
18. 3 Оборудование для обработки продуктов прессованием	204
Контрольные вопросы и задания:	212

Список использованной литературы 213



ВВЕДЕНИЕ

Текст лекций по дисциплине «Процессы и аппараты пищевых производств» (ПАПП) содержит сведения, необходимые бакалавру техники и технологии, о рациональной эксплуатации машин и аппаратов с минимальными материальными и энергетическими затратами и с максимальным использованием мощности оборудования и необходимые инженеру сведения о разработке машин и аппаратов, расчете их оптимальных размеров, энерго- и металлоемкости и экономической эффективности.

Овладение дисциплиной ПАПП позволит осуществлять в производственных условиях наилучшие технологические режимы, повышать производительность аппаратуры и улучшать качество продукции; даст возможность разрабатывать более рациональные технологические схемы и типы аппаратов при проектировании новых производств, правильно оценить результаты научных исследований в лабораторных условиях и реализовать их на практике.



ЛЕКЦИЯ №1

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАУКИ О ПРОЦЕССАХ И АППАРАТАХ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

1.1 Содержание и задачи курса ПАПП

Современное учение о процессах и аппаратах базируется на таких науках, как химия, физика, математика, некоторых технических и экономических дисциплин - механика, теплотехника, электротехника, материаловедение, промышленная экономика. Однако, как наука учение о процессах и аппаратах имеет свой ясно очерченный предмет, свои экспериментальные и расчетные методы и теоретические закономерности. В курсе ПАПП изучается совокупность физических и биохимических процессов, и пути их осуществления в промышленном производстве различных продуктов в конкретных технико-экономических условиях.

Любой технологический процесс, несмотря на различие методов, представляет собой ряд взаимосвязанных типовых технологических стадий, протекающих в аппаратуре определенного класса. Однако высокие требования к качеству продукции, эффективности производства, снижению его энерго- и материалоемкости, охране окружающей среды определяют специфику, отличающую эти технологические стадии получения пищевых продуктов и аппаратурно-технологическое оформление от подобных процессов в других отраслях промышленности.

По существу, курс является теоретической основой пищевой технологии, позволяющей проанализировать и рассчитать процесс, определить оптимальные параметры, разработать и рассчитать аппаратуру для его проведения. В нем изучаются закономерности масштабного перехода от лабораторных процессов и аппаратов к промышленным. Знание этих закономерностей необходимо для проектирования и создания современных пищевых производств.

Технологи и инженеры должны обладать широким кругозором, понимать научные принципы аппаратурно-технологического оформления процессов, уметь оценить основные технико-экономические характеристики оборудования и выбрать оптимальные, выявить резервы повышения интенсивности и экономичности процессов. Они должны также владеть методами научных исследований для повышения эффективности производства.



1.2 Возникновение и развитие науки о процессах и аппаратах

Учение о процессах и аппаратах возникло в начале XX в. одновременно и независимо в нашей стране и в США. В России основы науки о процессах и аппаратах были заложены известными учеными-инженерами А.К. Крупским в Петербургском технологическом институте и И.А. Тищенко в Московском высшем техническом училище. При этом был использован богатый фактический материал, накопленный в промышленности, и то огромное научное наследие в области химической технологии, которое оставил Д. И. Менделеев.

Впервые в России систематический курс основных процессов и аппаратов химической технологии был прочитан И.А. Тищенко в 1913г. Быстрый прогресс этой науки начался в 20—30-х годах XX в. Идеи А.К. Крупского были развиты в Ленинградском технологическом институте Д.П. Коноваловым и впоследствии А.А. Кировым, Л.Ф. Фокиным, К.Ф. Павловым и их учениками. Большим событием в развитии химической технологии как науки явилась книга Л.Ф. Фокина «Методы и орудия химической техники», вышедшая в 1923г. одновременно с известной монографией американских ученых В. Уокера, В.К. Льюиса и В.Х. Мак-Адамса «Принципы химической техники», а в 1931 г. вышла монография В. Бэджера и В. Мак-Кэба «Основные процессы и аппараты химических производств».

В Москве наука о процессах и аппаратах получила особое развитие в Химико-технологическом институте им. Д.И. Менделеева, организованном в 1920г. Научную школу здесь возглавили А.Г. Касаткин и В.В. Кафаров; в МИХМе — А.Н. Плановский, в МИТХТе им. М.В. Ломоносова — Н.И. Гельперин. Научные школы были созданы также в ЛТИ им. Ленсовета (П.Г. Романков) и в КТИППе (В.Н. Стабников).

Процессы и аппараты химической и пищевой технологий не имеют принципиальных различий: используются одни и те же законы, методы расчета оборудования. Тем не менее, специфика, связанная с пищевыми производствами, нашла отражение в характере изложения курса, в методиках расчета отдельных процессов и аппаратов, в изложении конструкций аппаратов и машин.

Наука о процессах и аппаратах призвана играть большую роль в интенсификации развития пищевой и смежных отраслей промышленности и тем самым способствовать удовле-



творению потребностей населения в продуктах питания.

1.3 Классификация основных процессов пищевой технологии

Само понятие «процесс» предполагает некоторое преобразование материи, протекающее в пространстве и во времени. Оно происходит под воздействием побуждающих факторов и характеризуется начальным и конечным состояниями. Каждый элементарный акт проявления побуждающего фактора и его воздействия на продукт можно рассматривать как процесс, который, с одной стороны являются относительно простыми, так как не приводит к полному преобразованию продукта, а с другой - допускает дальнейшее разбиение на более простые составляющие.

Все многообразие процессов пищевой технологии в зависимости от закономерностей их протекания можно свести к пяти основным группам: гидромеханические, теплообменные, массообменные, механические, химические.

Гидромеханические процессы – это процессы, скорость которых определяется законами механики и гидродинамики. К ним относятся процессы перемещения жидкостей и газов по трубопроводам и аппаратам, перемешивания жидких и сыпучих продуктов, фильтрования, осаждения, мойки корнеплодов, пневмо- и гидротранспортирования, псевдоожижения сыпучих продуктов и др. Они протекают под влиянием суммы механических (в частности, центробежных или гравитационных) и гидродинамических воздействий, а их результатом является пространственное перемещение отдельных агломератов продукта или элементов смеси продуктов. Эти процессы реализуются в пневматических и гидравлических классификаторах, фильтрах, осадителях, центрифугах, сепараторах, циклонах, пневмо-, гидро- и аэрозольных транспортирующих устройствах, гидромеханических моечных машинах, смесителях жидких и сыпучих продуктов, сушилках и др.

Теплообменные процессы – это процессы, связанные с переносом теплоты от более нагретых тел (или сред) к менее нагретым. К ним относятся процессы нагревания, охлаждения, пастеризации, стерилизации, выпаривания и конденсации и т.п. Они протекают под действием разностей температур. Данные процессы реализуются в нагревателях, охладителях, выпарных аппаратах, конденсаторах и др.

Массообменные процессы – это процессы, связанные с переносом вещества в различных агрегатных состояниях из одной



Процессы и аппараты пищевых производств

фазы в другую. К ним относятся процессы сушки, сорбции, перегонки, кристаллизации, растворения, экстрагирования, экстракции и др. Они протекают под действием разностей концентраций веществ. Данные процессы реализуются в абсорберах, адсорберах, перегонных устройствах, сушилках, кристаллизаторах, растворителях, экстракторах и др.

Механические процессы - это процессы механического взаимодействия тел. К ним относятся процессы измельчения (дробление и резание), сортирования, прессования, окатывания, округления и др. Они протекают под действием механических усилий, а их результатом является изменение размеров частиц продукта. Эти процессы реализуются в мельничных комплексах, дробилках, крупорушках, терках, волчках, измельчителях, просеивающих машинах (ситовых поставах, буратах и др.), триерах, веялках, прессах и др.

Химические процессы – это процессы, связанные с изменением химического состава и свойств вещества, скорость протекания которых определяется законами химической кинетики. Многочисленные химические процессы пищевых производств выделены в самостоятельную группу, включающую биохимические и физико-химические процессы.

К *биохимическим процессам* относят процессы ферментации, брожения, стерилизации, пастеризации, дезинфекции, промывки тары и ее чистки и др. Результатом этих процессов является изменение в объеме продукта или на поверхности тары концентрации сахаров, дрожжевых культур, бактерий и продуктов их жизнедеятельности, спор, загрязняющих веществ и др.

К *физико-химическим* процессам относят горение и взрывы. Подробно они изучаются специальными научными дисциплинами.

Периодические и непрерывные процессы. Основные процессы пищевой технологии делятся по способу организации на периодические и непрерывные. *Периодические процессы* характеризуются тем, что все стадии (загрузка сырья, обработка и выгрузка готового продукта) осуществляются в одном аппарате, но в разное время. *Непрерывные процессы* характеризуются тем, что все их стадии протекают одновременно, но разделены в пространстве, так как осуществляются либо в различных частях проточного аппарата, либо в разных аппаратах, составляющих данную установку.

Основные преимущества непрерывных процессов по сравнению с периодическими процессами заключаются в следующем:

- отсутствуют затраты времени на загрузку и выгрузку;



Процессы и аппараты пищевых производств

- появляется возможность создания качественной системы регулирования режимных параметров, что позволяет обеспечить более высокую стабильность качества готовой продукции;
- оборудование имеет меньшие габариты при равной производительности с периодически действующим оборудованием, что сокращает затраты на изготовление, ремонт, амортизационные отчисления, эксплуатацию и монтаж;
- повышается тепловой коэффициент полезного действия, так как при отсутствии перерывов в работе более полно используется подводимая теплота, нет потерь ее при разгрузке продукции;
- улучшаются условия обслуживания аппаратов путем устранения операций их загрузки и разгрузки, уменьшается потребность в обслуживающем персонале.

В зависимости от изменения параметров во времени (скоростей, температуры, концентраций и др.) процессы могут быть разделены на установившиеся (стационарные) и не установившиеся (нестационарные, или переходные). При *установившемся процессе* значение каждого из параметров зависит только от положения рассматриваемой точки в аппарате, но не зависит от времени. В *неустановившихся* процессах параметры переменные и зависят не только от положения рассматриваемой точки в объеме аппарата, но и от времени.

Для непрерывных процессов изменение параметров во времени имеет место только в период пуска установок.

Классификационные признаки оборудования. Оборудование пищевых производств насчитывает более двух тысяч единиц, относящихся к самым разным процессам. Изучение столь большой номенклатуры машин и аппаратов невозможно без систематизации знаний, основанной на научно обоснованной классификации.

Основные используемые в настоящее время классификационные признаки оборудования пищевых производств следующие:

Технологическая схема процесса. В соответствии с этим признаком различают аппараты поточные, противоточные и с поперечным током;

Непрерывность процесса. По этому признаку различают аппараты, работающие периодически или непрерывно;

Давление в рабочем объеме. Аппараты могут быть с атмосферным, повышенным или пониженным давлением в рабочем объеме;



Процессы и аппараты пищевых производств

Температура процесса. Этот классификационный признак подразумевает разделение аппаратов на работающие при температурах, близких к температуре окружающей среды; при высоких температурах; при низких температурах;

Конструктивные признаки. К ним относится использование конкретных конструктивных элементов (туннели, башни, сферы и т.д.); применение известных конструктивных решений по транспортированию и перемешиванию продуктов (вращающиеся барабаны, ленточные конвейеры, вибропривод, пневмотранспорт и т.д.); способ подвода теплоты (кондуктивный, конвективный, радиационный); способ создания давления (насосом, с помощью столба жидкости и пр.).

Требования к оборудованию. Машины и аппараты пищевых производств должны удовлетворять технологическим, эксплуатационным, конструктивным, эргономическим, экономическим и другим требованиям.

Технологические требования определяются назначением аппарата и принятой технологией ведения процессов в нем. Они конкретизируются в зависимости от типа процесса, агрегатного состояния обрабатываемого продукта, его химического состава и физических свойств. Технологическими требованиями определяются форма рабочего объема аппарата и основные размеры элементов рабочей зоны, температура и давление в ней, скорость движения продуктов и степень турбулизации жидкостных потоков, необходимые площади контакта фаз, дополнительные воздействия на продукт, предотвращение инфицирования и загрязнения продукта.

Эксплуатационные требования чрезвычайно разнообразны. К ним относятся: высокая интенсивность процесса (производительность, отнесенная к какой-либо характеристике аппарата — объему рабочей камеры, площади нагревательных поверхностей); коррозионная устойчивость материалов; расход энергии; надежность; доступность для осмотра и ремонта и др.

Конструктивные требования зависят от многих факторов. К ним относятся: высокая степень унификации и взаимозаменяемости с другим оборудованием данного и родственных предприятий; малая трудоемкость сборки, монтажа и ремонта; удобство транспортировки и ремонта; минимальная масса, в том числе металлоемкость; технологичность изготовления и ремонта.

Эргономические требования включают эстетические требования и требования безопасности, в том числе требования обеспечения нормативных условий труда. Они направлены на предот-



Процессы и аппараты пищевых производств

вращение травм при эксплуатации оборудования, создание здоровых условий труда при безусловном выполнении санитарно-гигиенических требований к оборудованию, создание благоприятных психофизиологических условий для функционирования системы человек-машина—окружающая среда. Все эргономические требования стандартизованы.

Экономические требования формулируются из условия минимизации целевой функции затрат на производство продукции. В свою очередь, целевая функция затрат может учитывать условия проектирования, изготовления, монтажа и эксплуатации.

Контрольные вопросы и задания:

- 1) Перечислите задачи курса ПАПП.
- 2) Кем были заложены основы науки о процессах и аппаратах в России?
- 3) Как классифицируют процессы пищевых производств?
- 4) Как делятся процессы по способу организации?
- 5) Перечислите признаки, используемые при классификации оборудования пищевых производств.
- 6) Какие требования предъявляют к машинам и аппаратам пищевых производств?



ЛЕКЦИЯ №2

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ НАУКИ О ПРОЦЕССАХ И АППАРАТАХ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Основные законы науки о процессах и аппаратах

Энергетический баланс. Этот баланс составляют на основе закона сохранения и превращения энергии. Закон формулируется следующим образом: в изолированной системе сумма всех видов энергии является величиной постоянной, или энергия никогда не создается и не уничтожается — она только переходит из одной формы в другую. Отсюда следует вывод, что нельзя получить не что из ничего. Если обнаруживается изменение энергии, которое не входит в современный список форм энергии, если выясняется, что энергия исчезает или появляется как бы из ничего, то приходится придумывать новый вид энергии, который учел бы эту разницу. Нейтрон, например, был обнаружен вследствие недостачи в энергетическом балансе атомного реактора. Его открыл 1932 г. английский ученый Джеймс Чэдвик.

Разновидность энергетического баланса – тепловой баланс, который в общем виде записывается в виде уравнения:

$$\sum Q_H = \sum Q_K + \sum Q_{П},$$

где $\sum Q_H$ - количество вводимой теплоты; $\sum Q_K$ - количество отводимой теплоты; $\sum Q_{П}$ - потери теплоты.

Выводимая теплота учитывает различные составляющие:

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

где $\sum Q_1$ - количество теплоты вводимой с исходными веществами; $\sum Q_2$ - количество теплоты вводимой извне, например с теплоносителем, обогревающим аппарат; $\sum Q_3$ - тепловой эффект при физическом воздействии, например, или химических превращениях. Если теплота выделяется, то знак «+», если теплота поглощается, то знак «-»

Материальный баланс. Согласно закону сохранения массы



Процессы и аппараты пищевых производств

количество поступающих в аппарат веществ $\sum M_H$ равно количеству веществ $\sum M_K$ получаемых в результате:

$$\sum M_H = \sum M_K + \sum M_{II}$$

Баланс составляют за единицу времени, например за 1 ч. На основе материального баланса определяют выход продукта.

Принцип Ле Шателье. Как же организуется на практике протекание сложных процессов, например процессов массообмена? Основа сложных процессов организации и управления ими - использование объективно существующей природной закономерности самостоятельного перехода любой системы к состоянию равновесия. Равновесным считают такое состояние системы, которое само устанавливается в ней и не изменяется во времени. Никакие процессы в системе при этом не происходят. Если каким-либо внешним воздействием вывести систему из состояния равновесия, в ней самопроизвольно начнутся изменения, возвращающие ее в новое состояние равновесия, соответствующее измененным внешним условиям. Это утверждение составляет сущность принципа Ле Шателье. Обусловленные этим принципом явления лежат в основе организации рабочих процессов физико-химической природы.

Пример 1. В цилиндрическом сосуде с водой и поршнем над ней равновесное давление паров над поверхностью воды самопроизвольно устанавливается соответствующим 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 искусственно организованный процесс конденсации.

Правило фаз Гиббса. В многокомпонентной многофазной системе часть параметров может изменяться независимо, т. е. им можно задавать произвольные значения; оставшаяся их часть является зависимой; их изменения автоматически подстраиваются к изменениям независимых параметров. Соотношение между числом степеней свободы системы S (числом параметров, которые можно изменять произвольно), числом компонентов K (числом чистых химических веществ системы) и числом фаз F (чис-



Процессы и аппараты пищевых производств

лом физически однородных по своей массе веществ) определяется правилом фаз Гиббса:

$$S = K - F + 2$$

Пример 2. В закрытом сосуде с раствором этилового спирта в воде число фаз $F=2$ (пар и жидкость); число компонентов $K=2$ (вода и спирт); число степеней свободы $F= 2-2+2=2$. Параметрами определяющими состояние системы, являются температура, давление и концентрация спирта. Произвольные значения могут быть заданы только для двух параметров, например для концентрации спирта и температуры. Давление же устанавливается самопроизвольно и определяется заданными параметрами. Если в данном примере сосуд оставить открытым (независимо поддерживать в нем заданное давление, равное атмосферному), то в смеси жидкостей начнутся процессы, направленные на восстановление равновесного значения давления (испарения или 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.

2.2 Методы исследования процессов и аппаратов

В данном курсе использованы следующие методы исследования: феноменологический, экспериментальный, аналитический, синтетический (теория подобия), системный.

Феноменологический метод. Сложность процессов пищевых производств и многообразие действующих факторов являются объективной основой широкого применения так называемых феноменологических зависимостей. Исторически сложилось так, что большое количество явлений переноса энергии и материи аппроксимировано зависимостями вида:

$$I = aX, \quad (2.2.1)$$

где I – скорость протекания процесса; a – постоянная; X – движущая сила процесса.

В класс таких явления попали: деформация твердого тела (закон Гука); движение электрического тока по проводнику (закон Ома); молекулярный перенос теплоты (закон Фурье); молекулярный перенос массы (закон Фика); обобщенные (не только молекулярные) закономерности переноса теплоты и массы; потери энергии при движении жидкости по трубопроводу (законы Дарси и Вейсбаха); движение тела в сплошной среде (закон трения Нью-



Процессы и аппараты пищевых производств

тона) и т. д. В законах, описывающих данные явления, постоянные имеют физический смысл и называются соответственно: модуль упругости, электрическое сопротивление, молекулярная теплопроводность, коэффициент молекулярной диффузии, конвективная теплопроводность или коэффициент турбулентной диффузии, коэффициент трения Дарси, вязкость и т. д. Обратив на это внимание, бельгийский физик русского происхождения И. Пригожий, нидерландские физики Л. Онзагер, С. де Гроот и др. обобщили эти явления в виде соотношения (2.2.1), которое получило название феноменологического, или соотношения логики явлений. Оно составило основу феноменологического метода исследований, суть которого кратко формулируется так: при малых отклонениях от состояния равновесия скорость протекания I любого сложного процесса пропорциональна движущей силе этого процесса X .

Основная трудоемкость исследований с применением этого метода заключается в выявлении факторов или параметров, которые являются побудителями данного процесса, и факторов, характеризующих его результат. Выявив их, связь между ними представляют в виде зависимости (2.2.1), а численное значение связывающего их коэффициента, а определяют экспериментально. Например, если движущей силой процесса экстрагирования является разность концентраций ΔC экстрагируемого вещества в сырье и в экстрагенте, а скорость процесса характеризуется производной концентрации этого вещества C в сырье по времени, то можно записать:

$$\frac{dC}{dt} = B \Delta C,$$

где B – коэффициент скорости экстрагирования.

Всегда можно назвать целый ряд параметров, характеризующих как движущую силу, так и результативность процесса. Как правило, они однозначно связаны между собой. Поэтому феноменологическое уравнение может быть записано во многих вариантах, т. е. для любой комбинации параметров, характеризующих движущую силу и результативность процесса.

Пример 3. В результате подключения трубчатого электронагревателя (ТЭН) к сети электропитания он нагревается и выделяет теплоту. Характеризуя процесс получения теплоты путем нагревания ТЭНа электрическим током, в качестве обобщенной побуждающей силы можно выбрать, например, разность напряжений электрического тока на зажимах ТЭНа (ΔU), а в качестве



Процессы и аппараты пищевых производств

характеристики результативности процесса — тепловую мощность N , отдаваемую ТЭНом окружающей среде. Феноменологическое уравнение, описывающее данный процесс, будет иметь вид:

$$N = a\Delta U \qquad a = \frac{\Delta U}{R},$$

где R – электрическое сопротивление ТЭНа, Ом

Однако результативность рассматриваемого процесса может характеризоваться еще целым рядом других параметров: температурой поверхности ТЭНа в заданных условиях взаимодействия с окружающей средой; температурой нагревающей спирали внутри ТЭНа; температурой одной из многочисленных характерных точек в сложном температурном поле, реализующемся в выбранном техническом устройстве с рассматриваемым ТЭНом; линейным удлинением нагревателя или любого другого элемента упомянутого технического устройства; ресурсом работы ТЭНа в составе того же устройства; темпом нагрева при включении и т. д.

В качестве обобщенной побуждающей силы помимо названной может быть выбран любой из указанных выше параметров.

Таким образом, в большом перечне названных факторов только один может изменяться независимо. Все остальные функционально связаны друг с другом и потому называются зависимыми от него. По аналогии с правилом Гиббса и в тех же терминах можно сказать, что феноменологические зависимости, описывающие технологические процессы пищевых производств, обладают только одной степенью свободы.

Феноменологический метод, являясь формальным, не раскрывает физической сущности протекающих процессов. Однако его широко применяют вследствие простоты описания явлений и простоты использования экспериментальных данных.

Представление феноменологических зависимостей в виде линейных функций не противоречит тому, что сложный физико-химический процесс может характеризоваться значительно более сложной функциональной связью причины и следствия. Дело в том, что феноменологические зависимости применимы, как это уже было сказано, при малых отклонениях от состояния равновесия, а более сложные функциональные зависимости проявляются в общем случае, т. е. не только при малых величинах действующих факторов.

В общем случае связь действующих факторов и реакций



Процессы и аппараты пищевых производств

системы может описываться функциями любой сложности. Однако если эти функции аналитические (а в реальных процессах пищевых производств они практически все таковы), т. е. не имеют точек разрыва, как самих функций, так и их производных, то их можно разложить в ряды Тейлора или Маклорена по степеням аргумента (действующего фактора). При малых значениях аргумента эти ряды могут быть линеаризованы, т. е. в них могут отбрасываться все члены со степенями выше первой, что приводит их к виду (2.2.1).

Экспериментальный метод. На основании предварительного анализа исследуемой задачи отбирают факторы, оказывающие определяющее или существенное влияние на искомый результат. Отбрасывают факторы, влияние которых на результат мало. Отбрасывание факторов связано с поисками компромиссов между простотой анализа и точностью описания исследуемого явления.

Экспериментальные исследования проводят, как правило, на модели, но можно использовать для этого и промышленную установку. В результате экспериментальных исследований, выполняемых по определенному плану и с требуемой повторностью, выявляют зависимости между факторами в графической форме или в виде расчетных уравнений.

Экспериментальный метод имеет следующие преимущества: возможность достижения высокой точности выведенных зависимостей; высокая вероятность получения зависимостей или физических характеристик объекта исследования, которые никаким другим методом найти не удастся (например, теплофизические характеристики продуктов, степень черноты материалов).

Вместе с тем экспериментальный метод исследования имеет два существенных недостатка: большая трудоемкость, обусловленная, как правило, значительным числом факторов, влияющих на исследуемое явление; найденные зависимости являются частными, относящимися только к исследуемому явлению, а это означает, что они не могут быть распространены на условия, отличные от тех, для которых они получены.

Аналитический метод. Этот метод заключается в том, что на основе общих законов физики, химии и других наук составляют дифференциальные уравнения, описывающие целый класс подобных явлений.

Например, дифференциальное уравнение Фурье определяет распределение температур в любой точке тела, через которое теплота передается теплопроводностью:



Процессы и аппараты пищевых производств

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t$$

где a – коэффициент температуропроводности, м²/с; $\nabla^2 t$ – оператор Лапласа;

$$\nabla^2 t = \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}$$

Это уравнение справедливо для любой неподвижной среды.

Однако для получения кривой распределения температуры в среде в зависимости от продолжительности процесса и координаты исследуемой точки необходимо найти решение этого дифференциального уравнения с учетом условий однозначности. Эти условия позволяют выделить из всего класса однородных явлений конкретный процесс.

Условия однозначности включают: сведения о геометрических параметрах исследуемого объекта (форма, размеры); данные о физических свойствах среды; данные о состоянии объекта в начальный момент времени (начальные условия); условия, характеризующие состояние рассматриваемого объекта на границе с окружающей средой (граничные условия).

В частности, при граничном условии I рода задается зависимость температуры поверхности объекта от времени.

При граничном условии II рода задается зависимость теплового потока, падающего на объект, от времени.

Преимущество аналитического метода заключается в том, что полученные дифференциальные уравнения справедливы для всего класса явлений (теплопроводность, теплообмен, массоперенос и т. д.).

Однако этот метод имеет существенные недостатки: сложность аналитического описания большинства технологических процессов, особенно процессов, сопровождающихся тепло- и массопереносом; этим объясняется то обстоятельство, что подобных расчетных формул известно сегодня мало; невозможность во многих случаях получить решение дифференциальных уравнений аналитическим путем с помощью известных в математике формул.

Теория подобия — синтетический метод исследования явлений, учение о методах научного обобщения экспериментов. Он дает возможность использовать преимущества экспериментального и аналитического методов и одновременно устранять их недостатки. Это достигается благодаря тому, что теория подобия:



Процессы и аппараты пищевых производств

устанавливает правила, как надо ставить опыты и как обрабатывать их результаты, чтобы при проведении небольшого числа экспериментов можно было обобщать опытные данные, получая единые уравнения для всех подобных явлений; использует математическую формулировку задачи и принятые условия однозначности, но при этом не требуется решения задачи аналитическим путем.

Системный метод. При исследовании действующих пищевых производств с целью повышения их эффективности и при проектировании новых производств с минимальными потерями сырья и энергии перед специалистами встает необходимость решения трех проблем. К ним относятся анализ физико-технологических систем (ФТС), их оптимизация и синтез.

Анализ ФТС состоит в определении значений параметров выходных и промежуточных технологических потоков, а также показателя (или критерия) эффективности ФТС при заданных конструктивных и технологических параметрах аппаратов, в которых происходят определенные физико-технологические процессы. При этом структура технологических потоков между аппаратами известна, а значения параметров входных технологических потоков системы заданы.

Оптимизация ФТС заключается в нахождении таких значений конструктивных и технологических параметров аппаратов, а также параметров технологических потоков между аппаратами, которые при существующих типах и конструкциях аппаратов, а также при известных структурах технологических потоков между аппаратами обеспечивают оптимальное значение показателя (или критерия) эффективности функционирования системы. Оптимизация ФТС предусматривает многократное решение задачи анализа системы при различных значениях оптимизирующих или управляющих параметров (или факторов).

Поиск решения задач анализа и оптимизации ФТС представляет собой совокупность вычислений по определенному алгоритму, одинаковому для всех анализируемых или оптимизируемых ФТС.

Синтез ФТС состоит в том, чтобы при известных способах переработки сырья в определенные пищевые продукты требуемого качества разработать оптимальную технологическую схему производства планируемого целевого продукта. Оптимальную технологическую схему производства разрабатывают путем выбора физико-технологических процессов требуемых типов и их аппаратного оформления, создания рациональной структуры тех-



Процессы и аппараты пищевых производств

нологических связей между аппаратами, определения конструктивных и технологических параметров аппаратов, а также параметров технологических потоков системы, которые обеспечат оптимальное значение показателя эффективности функционирования ФТС.

Принципиальное отличие задач синтеза ФТС от рассмотренных выше задач анализа и оптимизации заключается в том, что разработка (или поиск) оптимальных технологических систем ФТС представляет собой совокупность: творческих, и обычных вычислительных операций по выбору типа физико-технологического процесса (ФТС) и конструкций аппаратов; разработке рациональной структуры технологических связей между аппаратами; созданию математических моделей ФТС.

При этом творческие, интеллектуальные операции не поддаются полной формализации и алгоритмизации, а могут осуществляться только человеком в режиме диалога с компьютерной базой данных. Режим диалога позволяет наиболее полно реализовать эвристические способности мышления человека в процессе поиска и принятия решений по созданию высокоэффективных технологических схем ФТС.

Задача синтеза ФТС постепенно усложняется вследствие роста объема и интеллектуального уровня научно-технической информации. Высокоэффективной ФТС называют систему, которая обеспечивает заданную производительность по выпуску высококачественных продуктов при оптимальных расходах сырья, топливно-энергетических ресурсов и конструкционных материалов. При этом должен быть гарантирован оптимальный уровень надежности оборудования и технологической схемы в целом.

Показатель эффективности (или критерий оптимизации) должен достаточно полно характеризовать качество функционирования ФТС.

2.3 Метод анализа размерностей

При изучении многих сложных процессов не всегда удается составить дифференциальное уравнение, описывающее процесс, и сформулировать условия однозначности, поэтому невозможно и применение теории подобия. В этом случае, при условии, что в результате экспериментального изучения процесса известно какие физические величины оказывают существенное влияние на процесс, для получения критериальных уравнений применяют метод анализа размерностей.



Процессы и аппараты пищевых производств

Размерности физических величин и анализ размерностей. Когда речь идет о размерности величины, имеют в виду основные единицы или основные величины, с помощью которых можно построить данную величину. Размерность площади, например, всегда равна квадрату длины (сокращенно $[L^2]$; квадратные скобки здесь и далее обозначают размерность); единицами измерения площади могут быть квадратный метр, квадратный сантиметр, т.п. Скорость же может измеряться в единицах км/ч, м/с и миль/ч, но размерность ее всегда равна размерности длины $[L]$, деленной на размерность времени $[T]$, т. е. мы имеем $[L/T]$. Формулы, описывающие величину, в разных случаях могут быть различны, но размерность сохраняется той же самой. Например, площадь треугольника с основанием b и высотой h равна $S = (1/2)bh$, а площадь круга радиусом r равна $S = \pi r^2$. Эти формулы отличаются друг от друга, но размерности в обоих случаях совпадают и равны $[L^2]$.

При определении размерности величины обычно пользуются размерностями основных, а не производных величин. Например, сила имеет размерность массы $[M]$, умноженной на ускорение $[L/T^2]$ т.е. ее размерность равна $[ML/T^2]$. Правило подбора размерностей может помочь при выводе различных соотношений; такая процедура называется анализом размерностей. Один из полезных методов – это применение анализа размерностей для проверки правильности того или иного соотношения. В этом случае используются два простых правила. Во-первых, складывать или вычитать можно величины только одинаковой размерности (нельзя складывать сантиметры и граммы); во-вторых, величины, стоящие в обеих частях любого равенства, должны иметь одинаковые размерности.

Рассмотрим применение метода анализа размерностей на конкретном примере получения формулы для периода T колебаний математического маятника.

Очевидно, что период колебаний, T зависит от длины маятник, L , массы m и ускорения свободного падения g (в невесомости маятники не колеблются!)

Представим общую функциональную зависимость в виде степенной функции:

$$T = c \cdot L^a \cdot m^\beta \cdot g^\gamma,$$

где c - безразмерный коэффициент.

Заменим величины формулами размерностей этих величин:



Процессы и аппараты пищевых производств

$$[c]^{-1} = [kz]^{\beta} [M]^{\alpha+\gamma} [c]^{-2\gamma}$$

Приравняв показатели степеней при одинаковых символах размерностей и получим систему уравнений:

$$1 - 2\gamma$$

$$0 = \beta$$

$$0 = \alpha + \gamma \rightarrow \gamma = -1/2, \beta = 0, \alpha = 1/2$$

Таким образом получим формулу для периода колебаний математического маятника в виде:

$$T = c \cdot \sqrt{\frac{L}{g}} \quad \text{точная формула} \rightarrow T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{L}{g}}$$

Контрольные вопросы и задания:

- 1) Что такое движущая сила процесса?
- 2) Приведите примеры движущих сил для двух-трех выбранных вами процессов или физических явлений.
- 3) Что такое феноменологический коэффициент? Приведите примеры других названий феноменологических коэффициентов в выбранных вами процессах и явлениях.
- 4) Для чего в теории процессов и аппаратов пищевых производств используют принцип Ле Шателье?



ЛЕКЦИЯ №3

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПОДОБИЕ ПРОЦЕССОВ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

3.1 Моделирование процессов пищевой технологии

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

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

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

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

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

перенос электричества $i = -(1/\rho) (dU/dx)$;

перенос количества

энергии (закон трения Ньютона) $\tau = -\mu(dv/dx)$;

перенос вещества $\tau = -D(dc/dx)$;

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

где dU/dx , dv/dx , dc/dx , dt/dx — градиенты соответственно



Процессы и аппараты пищевых производств

напряжения, скорости, концентрации и температуры.

Если ввести соответствующие пересчетные коэффициенты, любой из перечисленных процессов можно смоделировать переносом электричества. На исследовании электрических моделей основаны работы аналоговых вычислительных машин, позволяющих моделировать физико-химические и биохимические процессы различной природы. Применение принципа аналогии превращает модель в расчетно-решающее устройство, что в определенной степени устраняет различие между теоретическим и экспериментальным исследованиями процесса.

В ряде случаев чрезвычайная чувствительность потоков, в которых осуществляется процесс, к внешним возмущениям, а следовательно, и к самым незначительным изменениям условий взаимодействия потока с окружающей средой заставляет отказаться от строго аналитического исследования, предполагающего фиксацию условий на границах системы. И в распоряжении исследователя остаются лишь полуэмпирические методы исследования, в том числе метод теории подобия, в разработку которого внесли большой вклад М. В. Кирпичев и А. А. Гухман.

3.2 Основные положения теории подобия

Теория подобия базируется на трех теоремах, которые отвечают на три основных практических вопроса: а) какие величины необходимо измерять при экспериментальном исследовании явления? б) как обрабатывать результаты эксперимента, чтобы иметь возможность обобщать опытные данные для всех подобных явлений? в) какие явления подобны изучаемому явлению?

Теоремы подобия основаны на понятии о подобии физических явлений.

Геометрическое подобие. Как известно из геометрии, у подобных геометрических фигур (треугольников, многоугольников и др.) отношения сходственных сторон одинаковы. Подобные фигуры отличаются одна от другой только масштабом и могут быть получены одна из другой умножением сходственных сторон одной из них на некоторый постоянный масштабный множитель.

Эти безразмерные масштабные множители называют константами подобия. Например, если стороны одного треугольника А, В и С, сходственные стороны подобного ему треугольника а, в

$$\frac{A}{a} = \frac{B}{b} = \frac{C}{c} = C_1 = const,$$

и с, то



Процессы и аппараты пищевых производств

где C_1 – константа геометрического подобия (индекс 1 показывает на подобие линейных размеров фигур).

Для тех же подобных треугольников можно записать

$$\frac{A}{B} = \frac{a}{b} = \frac{C}{B} = \frac{c}{b} = i$$

В отличие от предыдущего уравнения здесь сравниваются стороны одной и той же фигуры. Величину i называют инвариантом подобия.

Для описания подобия трех треугольников требуется два любых инварианта.

$$\frac{A}{c} = \frac{a}{c} = \frac{a'}{c'} = i_{11} = const, \quad \frac{B}{c} = \frac{b}{c} = \frac{b'}{c'} = i_{21} = const$$

где a' , b' и c' – стороны третьего треугольника.

В этих вариантах при измерении сторон треугольников A , a , a' , B , b , b' в качестве масштаба выбраны третьи стороны: C , c и c .

Физическое подобие. Физические явления называют подобными, если они происходят в геометрически подобных системах и если у них во всех сходственных точках в любые сходственные моменты времени отношения одноименных величин равны соответствующим константам подобия (температуры

C_t скорости C_w и др.).

В качестве примера рассмотрено подобие движения вязкой жидкости в натуре – производственном трубопроводе – и его уменьшенной модели (рис. 3.2.1).

Геометрическое подобие объектов и модели возможно при равенстве отношений всех сходственных линейных размеров натуре и модели:

$$\frac{L'}{L''} = \frac{D'}{D''} = C_l = const$$

где L' и L'' – длина натуре и модели; D' и D'' – диаметр натуре и модели.

Точки A'_0 и A''_0 являются сходственными, потому что и та, и другая находились на входе в рассматриваемые объекты.

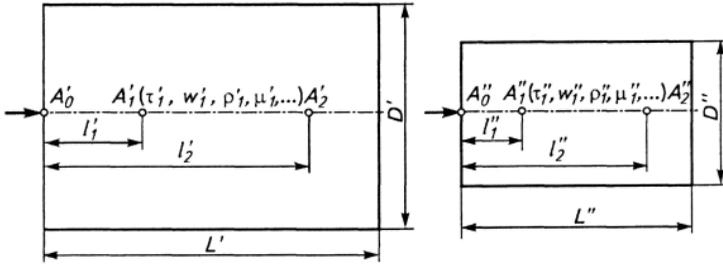


Рисунок 3.2.1 - Реальный объект и модель для рассмотрения подобия физических явлений

Точки A''_1 и A''_2 будут сходственными точками A'_1 и A'_2 в том случае, когда

$$\frac{l'_1}{l''_1} = \frac{l'_2}{l''_2} = C_l,$$

где l'_1, l''_1 и l'_2, l''_2 - пути, проходимые частицами жидкости от входа до сходственных точек в натуре и модели; C_l - константа геометрического подобия.

Сходственными моментами времени называют такие, которые имеют общее начало отсчета и связаны константой временного подобия.

Временное подобие характеризуется тем, что сходственные частицы в геометрически подобных системах, двигаясь по геометрически подобным траекториям, проходят геометрически подобные пути за промежутки времени, отношение которых является постоянной величиной. Константа временного подобия определяется из следующего уравнения:

$$\frac{T'}{T''} = C_T,$$

где T', T'' - время прохождения сходственными частицами всего трубопровода (натуры и модели соответственно).

Моменты времени будут сходственными, если для конкретных точек справедливо следующее уравнение:

$$\frac{\tau'_1}{\tau''_1} = \frac{\tau'_2}{\tau''_2} = C_\tau$$

где τ'_1, τ''_1 и τ'_2, τ''_2 - время прохождения сходственными



Процессы и аппараты пищевых производств

частицами подобных путей l'_1, l''_1 и l'_2, l''_2 .

Одноименными величинами являются такие, которые имеют один и тот же физический смысл и одинаковую размерность (например, скорость w , м/с; и др.).

Итак, в соответствии с формулировкой подобия физических явлений эпюры скоростей в рассматриваемом производственном трубопроводе и его модели будут подобными в том случае, если соблюдается следующее условие для сходственных точек:

$$\frac{w'_0}{w''_0} = \frac{w'_1}{w''_1} = \frac{w'_2}{w''_2} = C_w = \text{const}$$

чек:

где w'_0, w'_1, w'_2 - скорости в трубопроводе и w''_0, w''_1, w''_2 - скорости в сходственных точках модели.

Подобие граничных условий заключается в том, что отношение всех значений величин, характеризующих эти условия, для сходственных точек в сходственные моменты времени сохраняется постоянным.

Подобие начальных условий означает, что в начальный момент, когда начинается изучение процесса, соблюдается подобие полей физических величин, характеризующих процесс.

Если все индивидуальные признаки различных процессов, входящих в один класс, подобны, то процессы также подобны, т.е. подобные процессы представляют собой один процесс, протекающий в различных масштабах, так как подобные процессы описываются одинаковыми дифференциальными уравнениями, а индивидуальные признаки процессов (условие однозначности) различаются масштабом.

Для двух подобных процессов можно записать следующие функциональные зависимости между переменными, характеризующими эти процессы:

$$\text{для первого процесса} - f_1(H', h', \rho', \mu', \dots) = 0;$$

$$\text{для второго процесса} - f_2(H'', h'', \rho'', \mu'', \dots) = 0$$

$$\text{или} \quad f_3(K_l H'', K_l h'', K_\rho \rho'', K_\mu \mu'', \dots) = 0$$

Два первых уравнения описывают подобные процессы, а это значит, что уравнения не различаются. Третье уравнение описывает те же процессы и отличается от первых двух масштабными множителями. Для соблюдения подобия необходимо, чтобы при умножении переменных на масштабные множители не изменилось уравнение. Это условие соблюдено.



Процессы и аппараты пищевых производств

Определим условия подобия на примере дифференциального уравнения второго закона механики:

$$F = m(dv/dt),$$

где F – сила; m – масса; v – скорость; t – время.

Приведем уравнение к безразмерному виду. Для этого разделим обе части

уравнения на правую часть: $F dt / (m dv) = 1$. Тогда для первого из двух рассматриваемых подобных процессов $F' dt' / (m' dv') = 1$;

для второго - $F'' dt'' / (m'' dv'') = 1$.

Так как процессы подобны, заменим переменные первого процесса через соответствующие переменные второго процесса, умножим их на масштабные коэффициенты:

$$\frac{K_f F'' K_t dt''}{K_m m'' K_v dv''} = 1$$

Сгруппируем масштабные коэффициенты:

$$\frac{K_f K_t}{K_m K_v} \frac{F'' dt''}{m'' dv''} = 1$$

Полученное уравнение и уравнение второго процесса не должны различаться. Однако они различаются комплексом из произведения масштабных коэффициентов. Эти уравнения, очевидно, будут тождественны только тогда, когда этот комплекс

будет равен единице: $K_f K_t / (K_m K_v) = 1$. Это соотношение выражает условие подобия процессов: умножение переменных на постоянные масштабные коэффициенты не меняет самого дифференциального уравнения.

Заменим масштабные коэффициенты соответствующими значениями.

Тогда

$$\frac{(F'/F'')(t'/t'')}{(m'/m'')(v''/v')} = 1$$

или



Процессы и аппараты пищевых производств

$$\frac{F' \tau'}{m' v'} = \frac{F'' \tau''}{m'' v''} = \frac{F''' \tau'''}{m''' v'''} = \dots = \text{idem}$$

Выражение *idem* означает «одно и то же», т.е. в каждом подобном процессе комплексы переменных величин могут изменяться в пространстве и во времени, но в любых сходственных точках рабочего объема в сходственные моменты времени эти комплексы принимают одно и то же значение. Безразмерные комплексы, составленные по такому типу, называются критериями подобия.

Полученный выше критерий характеризует механическое подобие и называется критерием Ньютона: $Ne = F\tau(mv)$.

Получение критериев подобия из дифференциального уравнения сводится к следующим операциям: 1) составляют дифференциальное уравнение процесса; 2) дифференциальное уравнение приводят к безразмерному виду делением обеих частей уравнения на правую или левую часть, или деление всех слагаемых на один из членов с учетом его физического смысла; 3) вычеркивают символы дифференцирования. Символы степеней дифференциалов сохраняют.

Кроме критериев подобия, получаемых из дифференциальных уравнений, используют также параметрические критерии, представляющие собой соотношение двух одноименных величин и вытекающие непосредственно из условий задачи исследования.

Например, при изучении движения жидкости в канале процесс будет зависеть от соотношения длины трубы и диаметра

$l/d = \Gamma_1$ (где Γ_1 – геометрический критерий подобия), а также

относительной шероховатости и диаметра трубы $\Delta/d = \Gamma_2$. Линейный размер, входящий в эти критерии подобия, называются определяющим размером.

Все критерии подобия можно разделить на определяющие и определяемые. Определяющие критерии состоят только из физических величин, входящих в условия однозначности. Критерии подобия, в состав которых входит хотя бы одна величина, не входящая в условия однозначности, называются определяемыми.

Для обеспечения подобия необходимо равенство определяющих критериев, которое является достаточным условием подобия.

Неопределяющие критерии являются однозначной функцией определяющих критериев.



3.3 Теоремы подобия

Теория подобия базируется на трех теоремах.

Первая теорема подобия. Эта теорема была сформулирована И. Ньютоном в 1686г. для подобного течения двух жидкостей. Однако строгое доказательство теоремы было дано Ж. Бертраном в 1848 г.

Согласно этой теореме при подобии систем всегда могут быть найдены такие безразмерные комплексы величин (*критерии подобия*), которые для сходственных точек данных систем одинаковы по величине, т. е. подобные явления характеризуются численно равными критериями подобия.

Для доказательства этой теоремы рассмотрим равноускоренное движение тел, описываемое общим законом механики — вторым законом Ньютона:

$$f = ma = m \frac{dw}{dt} \quad (3.3.1)$$

Согласно этому закону в первой системе на частицу массой m действует сила f , которая за время dt увеличивает его скорость на dw . В модели на сходственную частицу массой m' действует сила f' , сообщая ей ускорение dw'/dt' . Имеем:

$$f = m' \frac{dw'}{dt'} \quad (3.3.2)$$

Если движение частицы в модели подобно движению частицы в натуре, то на основании условий подобия физических явлений уравнение (3.3.2) можно записать так:

$$f C_f = m C_m \frac{dw C_w}{dt C_t}, \quad (3.3.3)$$

где C_f – константа подобия сил; C_m – константа подобия масс, или

$$f = m \frac{dw}{dt} \cdot \frac{C_m C_w}{C_f C_t} \quad (3.3.4)$$

Из сопоставления уравнений (3.3.1) и (3.3.4) видно, что они отличаются комплексом

$$C = \frac{C_m C_w}{C_f C_t} \quad (3.3.5)$$

Величину C , составленную из констант подобия, называют *индикатором подобия*. При условии $C=1$ уравнения (3.3.1) и (3.3.4) совпадают. Поэтому первая теорема подобия может быть сформулирована также следующим образом: у подобных явлений

Процессы и аппараты пищевых производств

индикаторы подобия равны единице.

Преобразуем уравнение (3.3.5) при условии $C=1$:

$$C_m C_w = C_f C_\tau \quad (3.3.6)$$

Расшифруем константы подобия, и после подстановки их в уравнение (3.3.6) получим

$$C_m = \frac{m'}{m}; C_w = \frac{w'}{w}; C_f = \frac{f'}{f}; C_\tau = \frac{\tau'}{\tau}; \frac{f\tau}{mw} = \frac{f'\tau'}{m'w'} = const \quad (3.3.7)$$

При расшифровке констант подобия отбросили знак дифференциала, т.е. учитывали, что

$$\frac{dw}{d\tau} = \frac{w}{\tau}$$

Полученный комплекс (3.3.7) называют критерием Ньютона

$$Ne = \frac{f\tau}{mw} \quad (3.3.8)$$

Критерий Ньютона — главный критерий механического подобия и характеризует отношение импульса действующей на частицу силы к силе инерции.

Многие критерии гидродинамического подобия отражают соотношение между действующими в потоке силами, а именно между силами тяжести, трения, давления и силами инерции (критерии Фруда, Рейнольдса, Эйлера и др.). Таким образом, эти критерии представляют собой, по существу, частные случаи критерия Ньютона.

Первая теорема подобия устанавливает, какие величины следует измерять при проведении опытов, результаты которых требуется обобщить: надо измерять те величины, которые входят в критерии подобия.

Вторая теорема подобия. Она была доказана в 1911 г. русским ученым А. Федерманом и в 1941 г. американским ученым Е. Букингом. Согласно этой теореме решение любого дифференциального уравнения, связывающего между собой переменные, влияющие на процесс, может быть представлено в виде зависимости между безразмерными комплексами этих величин, т. е. между критериями подобия.

Если обозначить критерии подобия через $k_0, k_1, k_2, \dots, k_n$, то решение дифференциального уравнения может быть представлено в общем виде:

$$k_0 = C k_1^{m_1} k_2^{m_2} \dots k_n^{m_n},$$



Процессы и аппараты пищевых производств

где C, m_1, m_2, \dots, m_n – постоянные, определяемые экспериментально, например в модельных условиях.

Такие уравнения называют уравнениями в обобщенных переменных, а также обобщенными или критериальными уравнениями.

Однако прежде чем получить критериальное уравнение, необходимо решить следующие вопросы:

Сколько критериев подобия должно входить в критериальное уравнение, которым описывается интересующее нас явление?

Что собой представляют критерии, которые должны входить в критериальное уравнение?

Как определить значения постоянных коэффициентов и показателей степени в критериальных уравнениях?

На первый из этих вопросов отвечает *л-теорема*. Эта теорема формулируется следующим образом: всякое уравнение, связывающее N физических и геометрических величин, размерность которых выражена через l основных единиц измерения, можно преобразовать в уравнение подобия, связывающее π критериев:

$$\pi = N - n. \quad (3.3.9)$$

Приведем пример. Закон Пуазейля записывается в следующем виде:

$$\Delta p = \frac{32\mu l w}{d^2}, \quad (3.3.10)$$

где Δp – разность давлений, Па; μ – динамическая вязкость жидкости, Па·с; l – длина трубки, м; w – скорость течения жидкости, м/с; d – диаметр трубки, м.

$$\text{Динамическая вязкость} \quad \mu = \nu \rho, \quad (3.3.11)$$

где ν – кинематическая вязкость, м²/с; ρ – плотность жидкости, кг/м³.

Из уравнений (3.3.10) и (3.3.11) находим $N=6$, т. е. $\Delta p, \nu, \rho, l, w, d$. Преобразуем размерность разности давлений Δp (Па):

$$\text{Па} = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = \left(\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} \right) \frac{1}{\text{м}^2}.$$

Из анализа размерностей шести физических и геометрических величин находим, что $l = 3$, т. е. кг, м, с. Из уравнения (3.3.9) получим:

$$\pi = 6 - 3 = 3$$



Процессы и аппараты пищевых производств

Таким образом, явление, описываемое законом Паузейля, - движение жидкости в трубах при ламинарном режиме - может быть представлено в виде зависимости между тремя безразмерными комплексами. Действительно, движение жидкости в трубопроводах с гладкими стенками в пределах значений критерия Рейнольдса $4000 < Re < 10^5$ описывается уравнением:

$$Eu = 0,158 Re^{-0,25} \left(\frac{l}{d}\right)^n, \quad (3.3.12)$$

где Eu – критерий Эйлера, который является главным критерием, характеризующим процессы, протекающие под действием сил давления; Re - критерий Рейнольдса, который является главным критерием, характеризующим процессы, протекающие при движении вязких жидкостей.

В уравнение (3.3.12) входят два критерия-комплекса - Eu и Re и один критерий-симплекс (l/d), или параметрический критерий. Критерии-комплексы составляют из физических величин с неодинаковыми размерностями, а критерии-симплексы - из величин одинаковой размерности. В соответствии с п-теоремой каждой паре величин, входящих в описание явления и имеющих одинаковую размерность, в критериальном уравнении соответствует один критерий-симплекс. В нашем случае длина трубки и ее диаметр имеют одинаковую размерность (м), поэтому в критериальное уравнение входит отношение (l/d).

Второй вопрос, решаемый в рамках второй теоремы подобия, - это выбор способа получения критериев, входящих в критериальное уравнение. Существуют три способа получения критериев:

- а) из известных критериев-комплексов;
- б) из дифференциальных уравнений;
- в) методом анализа размерностей.

Первый способ - *получение критериев исследуемых явлений из известных критериев-комплексов*. Обсудим использование критерия Ньютона для определения критериев, описывающих процессы, которые протекают под действием различных сил.

Рассмотрим процессы, протекающие под действием сил тяжести и центробежных сил. Сила тяжести $f = mg$. С учетом этого уравнение (3.3.8) преобразуется к виду:

$$Ne = \frac{mg\tau}{mw} = \frac{g\tau}{w}$$

Этот комплекс всегда меньше единицы, поэтому в расче-



Процессы и аппараты пищевых производств

тах пользуются обратной величиной:

$$Fr = \frac{1}{Ne} = \frac{w}{g\tau} = \frac{a}{g} \quad (3.3.13)$$

где Fr – критерий Фруда, который является основным критерием, характеризующим рассматриваемые процессы.

Рассмотрим процессы, протекающие под действием сил давления. На элементарный объем жидкости кубической формы со стороной l , находящийся в потоке, действует разность давлений Δp , которая и обеспечивает движение этого объекта. Результирующая сила, действующая на поверхность этого объема

$$f = \Delta p l^2$$

Масса элементарного объема: $m = \rho l^3$

Продолжительность процесса получаем делением пути, который также обозначаем через l , на скорость: $\tau = \frac{l}{w}$

Подставляя полученные значения f , w и τ в уравнение (3.3.8), получим:

$$Ne = \frac{\Delta p l^2}{\rho l^3} \frac{l}{w^2} = \frac{\Delta p}{\rho w^2} = Eu$$

Второй способ получения критериев, входящих в критериальное уравнение, - это *вывод критериев из дифференциальных уравнений*.

Рассмотрим дифференциальное уравнение, которое описывает процесс теплообмена на поверхности стенки:

$$\alpha \Delta t = -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial l} \right)_{l=0'}$$

где α - коэффициент теплоотдачи от среды к стенке; Δt - разность между температурами среды и стенки; λ - коэффициент теплопроводности стенки; $\left(\frac{\partial t}{\partial l} \right)_{l=0'}$ - градиент температуры на границе раздела среды и стенки.

Уравнение для подобной системы имеет вид:

$$\alpha' \Delta t' = -\lambda' \left(\frac{\partial t'}{\partial l'} \right)_{l'=0}$$

С учетом изложенного выше для подобной системы теплообмена можно записать:



Процессы и аппараты пищевых производств

$$\alpha C_{\alpha} \Delta t C_{\tau} = -\lambda C_{\lambda} \frac{\partial t C_{\tau}}{\partial C_l}$$

Преобразуем это уравнение, опустив, что оно справедливо при $l \neq 0$:

$$\alpha \Delta t = -\lambda \frac{\partial t}{\partial l} \frac{C_{\lambda} C_{\tau}}{C_{\alpha} C_{\tau} C_l} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial l} \frac{C_{\lambda}}{C_{\alpha} C_l}$$

Видно, что подобие этих систем будет при условии равенства индикатора подобия C единице, т. е.

$$C = \frac{C_{\lambda}}{C_{\alpha} C_l} = 1$$

Расшифруем константы подобия и подставим их в это уравнение:

$$C_{\alpha} = \frac{\alpha}{\alpha'}; C_l = \frac{l}{l'}; C_{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda'} \cdot \frac{\lambda}{\lambda'} = \frac{\alpha}{\alpha'} \cdot \frac{l}{l'}$$

$$\text{Отсюда} \quad \frac{\alpha l}{\lambda} = \frac{\alpha' l'}{\lambda'} = Nu = const$$

Критерии подобия принято называть именами крупных ученых, известных своими работами в области теплообмена и гидродинамики. Записанный в уравнении критерий Nu называют критерием Нуссельта, который характеризует соотношение интенсивностей тепловых потоков, передающихся теплоотдачей и теплопроводностью.

Третий способ получения критериев, входящих в критериальное уравнение, - это *метод анализа размерностей* (см. п. 2.3).

Третий вопрос, решаемый во второй теореме подобия, - как определить значения постоянных коэффициентов и показателей степени в критериальных уравнениях.

Рассмотрим это на примере критериального уравнения (3.3.12) при условии, когда длина трубки l значительно превосходит ее диаметр, т.е. при условии $l \gg d$ уравнение (3.3.12) имеет вид:

$$E_u = 0,158 R_e^{-0,25}$$

Рассмотрим метод определения коэффициента 0.158 и показателя степени - 0,25.

В общем виде это уравнение можно представить в виде:

$$E_u = A R_e^m$$

После логарифмирования этого уравнения получим:

$$\lg E_u = \lg A + m \lg R_e \quad (3.3.14)$$

Процессы и аппараты пищевых производств

В логарифмических координатах — это уравнение прямой линии. На график (рис. 3.3.1) наносят опытные точки и через них проводят прямую линию.

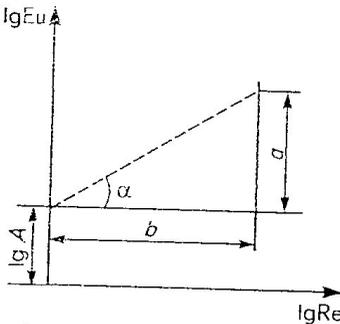


Рисунок 3.3.1 – Обработка экспериментальных данных при $n=2$

Из уравнения (3.3.14) получим:

$$m = \frac{\lg E_u - \lg A}{\lg R_e} \quad (3.3.15)$$

Из рисунка 3.3.1 получим:

$$\operatorname{tga} = \frac{\lg E_u - \lg A}{\lg R_e} = \frac{a}{b} \quad (3.3.16)$$

Из сопоставления выражений (3.3.16) и (3.3.15) получим $m = \operatorname{tga}$.

Из графика (см. рис. 3.3.1) находим $\lg A$ и по этой величине определяем истинное значение коэффициента A .

В случае, когда в уравнении три критерия, коэффициенты находят не по одному, а по двум графикам.

Таким образом, вторая теорема подобия отвечает на вопрос, как обрабатывать результаты экспериментов, выполненных на моделях: их надо представлять в виде критериального уравнения.

Третья теорема подобия. Она устанавливает необходимые условия для того, чтобы явления оказались подобными друг другу. Формулировка ее была дана М.В. Кирпичёвым и А.А. Гухманом, а доказательство теоремы - М.В. Кирпичёвым в 1933г.

Эта теорема может быть сформулирована следующим образом: подобны те явления, условия однозначности которых подобны, а критерии подобия, составленные из уравнений однознач-



Процессы и аппараты пищевых производств

ности, численно равны. Из формулировки теоремы следует: подобные явления протекают в геометрически подобных системах; граничные условия подобны; численные значения коэффициентов и физических параметров известны; для рассматриваемого явления можно составить дифференциальные уравнения, для которых установлена единственность решения.

Третья теорема устанавливает условием подобия равенство критериев, составленных только из тех величин, которые входят в условие однозначности. Такие критерии называют определяющими.

Контрольные вопросы и задания:

- 1) Что такое математическое и физическое моделирование?
- 2) В каком случае используется теория подобия для моделирования процессов?
- 3) На какие три практических вопроса отвечают теоремы подобия?
- 4) Как получают критерии подобия?
- 5) Какие бывают критерии подобия?



ЛЕКЦИЯ №4

ОСНОВЫ ГИДРАВЛИКИ. ГИДРОСТАТИКА

4.1 Основное уравнение гидростатики

Гидравлика состоит из двух разделов: гидростатика и гидродинамика. В гидростатике изучаются законы равновесия жидкостей и воздействие покоящихся жидкостей на погруженные в них тела и поверхности, ограничивающие жидкости. В гидродинамике - законы движения жидкостей и их воздействие на обтекаемые ими тела.

Физические свойства жидкости. Плотность ρ ($\text{кг}/\text{м}^3$) –

это отношение массы вещества к его объему:
$$\rho = \frac{m}{V}$$

где m – масса, кг; V – объём, м³.

Коэффициент объёмного сжатия β_w (Па^{-1}) – это относительное изменение объёма жидкости при изменении давления на единицу:

$$\beta_w = -\frac{\Delta W}{W \cdot \Delta p} = \frac{\Delta \rho}{\rho \cdot \Delta p}$$

где ΔW – изменение объёма W ; Δp – изменение плотности ρ , соответствующее изменению давления на величину Δp .

Величина, обратная коэффициенту объёмного сжатия, называется *модулем*

упругости жидкостей $E_{ж}$ (Па):
$$E_{ж} = 1/\beta_w$$

Значение модуля упругости жидкостей зависит от давления и температуры. Если принять, что приращение давления $\Delta p = p - p_0$, а изменение объёма $\Delta W = W - W_0$, то:

$$W = W_0 \cdot (1 - \beta_w \cdot \Delta p),$$

$$\rho = \rho_0 \cdot (1 - \beta_w \cdot \Delta p).$$

Коэффициент температурного расширения β_t ($^{\circ}\text{C}$)⁻¹ выражает относительное изменение объёма жидкости при изменении температуры на один градус:

$$\beta_t = \frac{\Delta W}{W \cdot \Delta t},$$

где ΔW – изменение объёма W , соответствующее изменению температуры на величину Δt .



Процессы и аппараты пищевых производств

Коэффициент температурного расширения воды увеличивается с возрастанием температуры и давления; для большинства других капельных жидкостей β_t с увеличением давления уменьшается. Если принять, что приращение температуры $\Delta t = t - t_0$, а изменение объёма $\Delta W = W - W_0$, то:

$$W = W_0 (1 + \beta_t \cdot \Delta t),$$

$$\rho = \rho_0 (1 + \beta_t \cdot \Delta t).$$

Вязкость – это свойство жидкости проявлять внутреннее трение при её движении, обусловленное сопротивлением взаимному сдвигу её частиц. В покоящейся жидкости вязкость не проявляется. Количественно вязкость может быть выражена в виде динамической или кинематической вязкости.

Динамический коэффициент вязкости μ ($\text{Па}\cdot\text{с} = \text{Н}\cdot\text{с}/\text{м}^2$) зависит от давления и от характера движения, а определяется лишь физическими свойствами жидкости и её температурой.

На практике для характеристики вязкости жидкости чаще применяют не коэффициент динамической вязкости, а коэффициент кинематической вязкости ν ($\text{м}^2/\text{с}$). *Коэффициентом кинематической вязкости* называется отношение коэффициента динамической вязкости к плотности жидкости:

Кинематическая вязкость определяется по уравнению:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Вязкость проявляется в том, что при движении жидкости возникает сила внутреннего трения T между перемещающимися один относительно другого слоями с площадью соприкосновения S , определяется законом Ньютона:

$$T = \mu S \frac{du}{dy}$$

где S – площадь соприкасающихся слоёв, м^2 ; du – скорость смещения слоя «b» относи-

тельно слоя «a», $\text{м}/\text{с}$; dy – расстояние, на котором скорость движения слоёв изменилась на du , м ; du/dy – градиент скорости, изменение скорости по нормали к направлению движения (с^{-1}).

Если силу трения T отнести к единице площади соприкасающихся слоёв, то получим величину касательного напряжения τ , которую можно определить по формуле:



$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

Вязкость жидкости определяется при помощи вискозиметра Энглера и выражается в градусах Энглера. Градус Энглера ($^{\circ}E$) есть отношение времени истечения исследуемой жидкости из некоего сосуда ко времени истечения того же объема дистиллированной воды из того же сосуда. Для перехода от вязкости в градусах Энглера к коэффициенту кинематической вязкости ν применяется формула Убеллоде:

$$\nu = \left(0,0731 - {}^{\circ}E \frac{0,0631}{{}^{\circ}E} \right) 10^4$$

Вязкость также определяется капиллярным вискозиметром Оствальда. Коэффициент кинематической вязкости определяется по формуле:

$$\nu = c T_{жс} \cdot 10^{-4},$$

где c – постоянная прибора; $T_{жс}$ – время истечения жидкости, с.

Гидростатическое давление. В покоящейся жидкости всегда присутствует сила давления, которая называется *гидростатическим давлением*. Жидкость оказывает силовое воздействие на дно и стенки сосуда. Частицы жидкости, расположенные в верхних слоях сосуда, испытывают меньшие силы сжатия, чем частицы жидкости, находящиеся у дна.

Рассмотрим резервуар с плоскими вертикальными стенками, наполненный жидкостью (рис. 4.1.1, а). На дно резервуара действует сила P , равная весу налитой жидкости $G = \gamma V$, т.е. $P = G$. Если эту силу P разделить на площадь дна S_{abcd} , то мы получим *среднее гидростатическое давление*, действующее на дно резервуара:

$$P_{cp} = \frac{P}{S_{abcd}}$$

Гидростатическое давление обладает свойствами. *Свойство 1.* В любой точке жидкости гидростатическое давление перпендикулярно площадке касательной к выделенному объему и действует внутрь рассматриваемого объема жидкости.

Для доказательства этого утверждения вернемся к рис. 4.1.1,а. Выделим на боковой стенке резервуара площадку $S_{бок}$ (заштриховано). Гидростатическое давление действует на эту

Процессы и аппараты пищевых производств

площадку в виде распределенной силы, которую можно заменить одной равнодействующей, которую обозначим P . Предположим, что равнодействующая гидростатического давления P , действующая на эту площадку, приложена в точке A и направлена к ней под углом φ (на рис. 4.1.1 обозначена штриховым отрезком со стрелкой). Тогда сила реакции стенки R на жидкость будет иметь ту же самую величину, но противоположное направление (сплошной отрезок со стрелкой). Указанный вектор R можно разложить на два составляющих вектора: нормальный R_n (перпендикулярный к заштрихованной площадке) и касательный R_τ к стенке. Сила нормального давления R_n вызывает в жидкости напряжения сжатия. Этим напряжениям жидкость легко противостоит. Сила R_τ действующая на жидкость вдоль стенки, должна была бы вызвать в жидкости касательные напряжения вдоль стенки и частицы должны были бы перемещаться вниз. Но так как жидкость в резервуаре находится в состоянии покоя, то составляющая R_τ отсутствует. Отсюда можно сделать вывод первого свойства гидростатического давления.

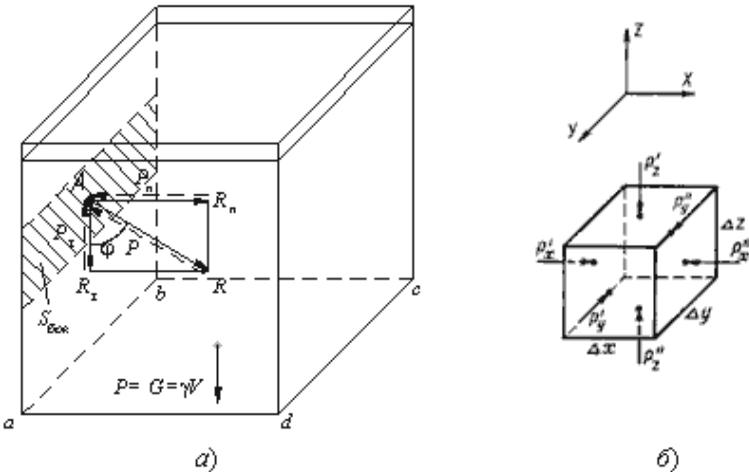


Рисунок 4.1.1- Схема, иллюстрирующая свойства гидростатического давления

а - первое свойство; б - второе свойство

Свойство 2. Гидростатическое давление неизменно во всех направлениях. В жидкости, заполняющей какой-то резервуар, выделим элементарный кубик с очень малыми сторонами Δx , Δy , Δz (рис.4.1.1, б). На каждую из боковых поверхностей будет давить сила гидростатического давления, равная произведению соответ-



Процессы и аппараты пищевых производств

ствующего давления P_x, P_y, P_z на элементарные площади. Обозначим вектора давлений, действующие в положительном направлении (согласно указанным координатам) как P'_x, P'_y, P'_z а вектора давлений, действующие в обратном направлении соответственно P''_x, P''_y, P''_z . Поскольку кубик находится в равновесии, то можно записать равенства:

$$P'_x \Delta y \Delta z = P''_x \Delta y \Delta z$$

$$P'_y \Delta x \Delta z = P''_y \Delta x \Delta z$$

$$P'_z \Delta x \Delta y + \gamma \Delta x, \Delta y, \Delta z = P''_z \Delta x \Delta y$$

где γ - удельный вес жидкости; $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ - объем кубика.

Сократив полученные равенства, найдем, что

$$P'_x = P''_x; P'_y = P''_y; P'_z + \gamma \Delta z = P''_z$$

Членом третьего уравнения $\gamma \Delta z$, как бесконечно малым по сравнению с P'_z и P''_z можно пренебречь и тогда окончательно

$$P'_x = P''_x; P'_y = P''_y; P'_z = P''_z$$

Вследствие того, что кубик не деформируется (не вытягивается вдоль одной из осей), надо полагать, что давления по различным осям одинаковы, т.е.

$$P'_x = P''_x = P'_y = P''_y = P'_z = P''_z$$

Это доказывает второе свойство гидростатического давления.

Свойство 3. Гидростатическое давление в точке зависит от ее координат в пространстве. Это положение не требует специального доказательства, так как ясно, что по мере увеличения погружения точки давление в ней будет возрастать, а по мере уменьшения погружения уменьшаться. Третье свойство гидростатического давления может быть записано в виде: $P=f(x, y, z)$

Основное уравнение гидростатики. Рассмотрим распространённый случай равновесия жидкости, когда на нее действует только одна массовая сила - сила тяжести, и получим уравнение, позволяющее находить гидростатическое давление в любой точке рассматриваемого объема жидкости.

Пусть жидкость содержится в сосуде (рис.4.1.2) и на ее свободную поверхность действует давление P_0 . Найдем гидростатическое давление P в произвольно взятой точке M , расположенной на глубине h . Выделим около точки M элементарную горизонтальную площадку dS и построим на ней вертикальный цилиндрический объем жидкости высотой h . Рассмотрим условие равновесия указанного объема жидкости, выделенного из общей массы жидкости. Давление жидкости на нижнее основание цилиндра теперь будет внешним и направлено по нормали внутрь



Процессы и аппараты пищевых производств

объема, т.е. вверх. Запишем сумму сил, действующих на рассматриваемый объем в проекции на вертикальную ось:

$$PdS - P_0 dS - \rho gh dS = 0$$

Последний член уравнения представляет собой вес жидкости, заключенной в рассматриваемом вертикальном цилиндре объемом hdS . Силы давления по боковой поверхности цилиндра в уравнение не входят, т.к. они перпендикулярны к этой поверхности и их проекции на вертикальную ось равны нулю. Сократив выражение на dS , и перегруппировав члены, получим:

$$P = P_0 + \rho gh = P_0 + h\gamma$$

Полученное уравнение называют основным уравнением гидростатики. По нему можно посчитать давление в любой точке покоящейся жидкости. Это давление, как видно из уравнения, складывается из двух величин: давления P_0 на внешней поверхности жидкости и давления, обусловленного весом вышележащих слоев жидкости.

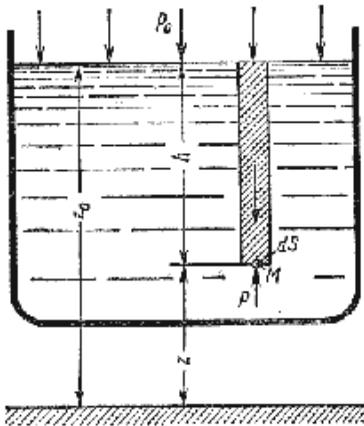


Рисунок 4.1.2 - Схема для вывода основного уравнения гидростатики

Из основного уравнения гидростатики видно, что на любую точку в объеме всего сосуда всегда будет действовать давление, приложенное к внешней поверхности P_0 . Другими словами давление, приложенное к внешней поверхности жидкости, передается всем точкам этой жидкости по всем направлениям одинаково. Это положение известно под названием *закона Паскаля*.

Поверхность, во всех точках которой давление одинаково, называется поверхностью уровня. В обычных условиях поверхности уровня представляют собой горизонтальные плоскости.



Поверхности равного давления. Поверхность, во всех точках которой давление одинаково, называется *поверхностью уровня* или *поверхностью равного давления*. При неравномерном или непрямолинейном движении на жидкость кроме силы тяжести действуют еще и силы инерции, причем если они постоянны по времени, то жидкость принимает новое положение равновесия. Такое равновесие жидкости называется *относительным покоем*.

Рассмотрим два примера такого относительного покоя.

В первом примере определим поверхности уровня жидкости, находящейся в цистерне, в то время как цистерна движется по горизонтальному пути с постоянным ускорением a (рис.4.1.3).

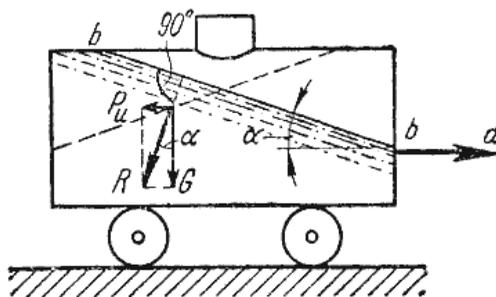


Рисунок 4.1.3 - Движение цистерны с ускорением

К каждой частице жидкости массой m приложены ее вес $G = mg$ и сила

инерции P_u , равная по величине ma . Равнодействующая

$R = \sqrt{(mg)^2 + (ma)^2}$ этих сил направлена к вертикали под уг-

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{a}{g}$$

лом α , тангенс которого равен:

Так как свободная поверхность, как поверхность равного давления, должна быть нормальна к указанной равнодействующей, то она в данном случае представит собой уже не горизонтальную плоскость, а наклонную, составляющую угол α с горизонтом. Учитывая, что величина этого угла зависит только от ускорений, приходим к выводу, что положение свободной поверхности не будет зависеть от рода находящейся в цистерне жидкости. Любая другая поверхность уровня в жидкости также будет плоскостью, наклоненной к горизонту под углом α . Если бы движение цистерны было не равноускоренным, а равнозамедленным, направление ускорения изменилось бы на обратное, и наклон



Процессы и аппараты пищевых производств

свободной поверхности обратился бы в другую сторону (см. рис.4.1.3, пунктир).

В качестве второго примера рассмотрим часто встречающийся в практике случай относительного покоя жидкости во вращающихся сосудах (например, в сепараторах и центрифугах, применяемых для разделения жидкостей). В этом случае (рис.4.1.4) на любую частицу жидкости при ее относительном равновесии действуют массовые силы: сила тяжести $G = mg$ и центробежная сила $P_u = m\omega^2 r$, где r - расстояние частицы от оси вращения, а ω - угловая скорость вращения сосуда.

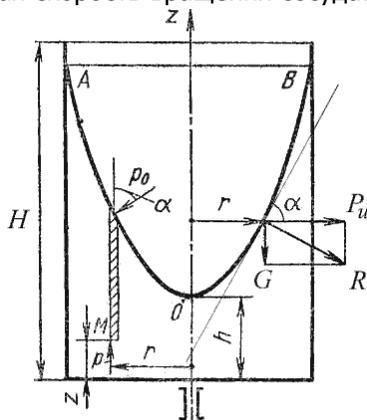


Рисунок 4.1.4 - Вращение сосуда с жидкостью

Поверхность жидкости также должна быть нормальна в каждой точке к равнодействующей этих сил R и представляет собой параболоид вращения. Из чертежа находим:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{P_u}{G} = \frac{m\omega^2 r}{mg}$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{dz}{dr},$$

С другой стороны:

где z - координата рассматриваемой точки.

Таким образом, получаем:

$$\frac{\omega^2 r}{g} = \frac{dz}{dr}$$

откуда:



Процессы и аппараты пищевых производств

$$dz = \frac{w^2}{g} r dr$$

$$z = \frac{w^2 r^2}{2g} + C$$

или после интегрирования получаем:

В точке пересечения кривой AOB с осью вращения $r = 0$, $z = h = C$, поэтому окончательно получаем:

$$z = h + \frac{w^2 r^2}{2g}$$

т.е. кривая AOB является параболой, а свободная поверхность жидкости параболоидом. Такую же форму имеют и другие поверхности уровня.

Для определения закона изменения давления во вращающейся жидкости в функции радиуса и высоты выделим вертикальный цилиндрический объем жидкости с основанием в виде элементарной горизонтальной площадки dS (точка M) на произвольном радиусе r и высоте z и запишем условие его равновесия в вертикальном направлении:

$$PdS - \underbrace{\left[h - z + \frac{\omega^2 r^2}{2g} \right]}_{\text{высота цилиндра}} \rho g dS - P_0 \left(\frac{dS}{\cos \alpha} \right) \cos \alpha = 0$$

После сокращений получаем:

$$P = P_0 + \left[h - z + \frac{\omega^2 r^2}{2g} \right] \rho g$$

Это значит, что давление возрастает пропорционально радиусу r и уменьшается пропорционально высоте z .

4.2 Приборы для измерения давления

На практике применяют способ отсчета давления – отсчет от атмосферного (барометрического) давления, равного 760 мм. рт. ст. В этом случае давление называют избыточным ризб. или манометрическим. Таким образом, избыточное давление равно разности между абсолютным давлением в рассматриваемой точке и атмосферным давлением в помещении. На избыточное давление рассчитывают сосуды, работающие под давлением.

Манометр. На рис. 4.2.1 показан U-образный трубчатый манометр. Один

конец U-образной трубки подсоединяется к источнику

Процессы и аппараты пищевых производств

измеряемого давления, а

другой соединен с атмосферой. Трубка заполнена водой или ртутью. Разница в положении менисков трубки является показанием прибора, который измеряет избыточное или манометрическое давление. Прибор используется для измерения низких значений давлений и, в частности, атмосферного давления воздуха.

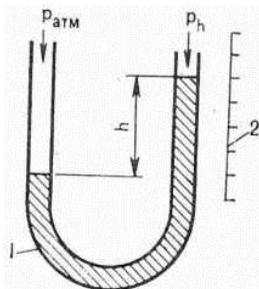


Рисунок 4.2.1 - U-образный трубчатый манометр:

1 — жидкость; 2 — шкала; p_h — давление в системе; $p_{атм}$ — атмосферное давление; h — манометрическое значение давления в системе

Ртутный барометр — это прямотрубный тип манометра (рис. 4.2.2). Стеклокапиллярная трубка, запаянная с одного конца, заполняется ртутью,

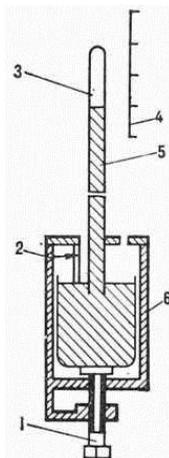


Рисунок 4.2.2 - Ртутный барометр:

1 — регулировочный винт; 2 — нулевая точка по шкале отсчета; 3 — вакуум; 4 — шкала; 5 — стеклянная капиллярная трубка; 6 — защитный корпус для ванны с ртутью



Процессы и аппараты пищевых производств

переворачивается и свободным концом опускается в небольшую ванну с ртутью. Часть ртути выходит в ванну и над мениском образуется вакуум, а столбик ртути в капилляре уравнивается действием атмосферного давления на ртуть в накопителе. Высота ртутного столбика определяет значение абсолютного давления атмосферы.

В барометре-анероиде (рис. 4.2.3) чувствительным элементом является деформируемая под действием атмосферного давления гофрированная мембранная коробочка. При увеличении атмосферного давления жесткий центр верхней мембраны перемещается вверх или, если давление уменьшается, опускается вниз под действием плоской пружины. С помощью шарнирных соединений при смещении жесткого центра происходит вращение стрелки показывающего прибора. Около стрелки расположена градуированная круговая шкала.

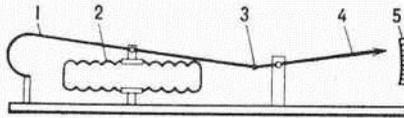


Рисунок 4.2.3 - Барометр-анероид:

1 — пружина; 2 — мембранный короб; 3 — шарнирное соединение; 4 — стрелка; 5 — шкала

Трубка Бурдона. Это, вероятно, самый распространенный измеритель манометрического давления (рис. 4.2.4). Чувствительным элементом является запаянная с одного конца трубка эллиптического сечения, выполненная в форме буквы G. Закрытый конец трубки при своем смещении с помощью шарнирного соединения вызывает вращение стрелки показывающего прибора вдоль шкалы.



Процессы и аппараты пищевых производств

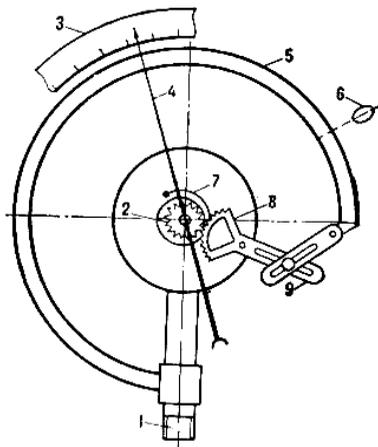


Рисунок 4.2.4 - Измеритель давления с трубкой Бурдона:

1 — патрубок для подсоединения к системе, в которой измеряется давление; 2 — ведомая шестеренка; 3 — шкала; 4 — стрелка; 5 — трубка Бурдона; 6 — поперечное сечение трубки Бурдона; 7 — волосковая пружина; 8 — зубчатый сектор; 9 — настроечное шарнирное соединение

Система, в которой измеряется давление, подсоединяется к открытому концу трубки, жестко закрепленному в корпусе. При изменении давления происходит деформация трубки и смещение ее свободного запаянного конца, значение которого можно фиксировать по шкале.

Измерителем другого типа, в котором происходит деформация трубки при изменении давления, является геликоидальная или спиральная пружина. Нулевое значение шкалы прибора соответствует обычно значению атмосферного давления, т. е. прибор показывает манометрическое давление, но прибор может применяться и для измерения вакуума.

Мембраны или сильфоны могут использоваться для измерения манометрического давления (рис. 4.2.5). Смещение диафрагмы или сильфона передается с помощью шарнирного соединения к стрелке показывающего прибора или к цифровому преобразователю.

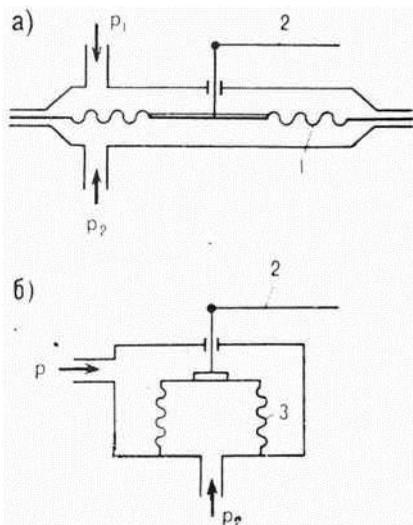


Рисунок 4.2.5 - Измерители давления:
 а — мембранный; б — сильфонный; 1 — мембрана; 2 — шарнирное соединение к стрелке дифференциального измерителя давления; 3 — сильфон; p_1 , p_2 — давления среды

Пьезоэлектрический измеритель давления — это кристалл, который, подвергаясь сжатию, электризуется, а значение появляющегося при этом тока пропорционально давлению сжатия. Ток подается к преобразователям, шкала которых отградуирована в единицах давления.

4.3 Примеры практического использования основного уравнения гидростатики

Сообщающиеся сосуды. Два закрытых сосуда А и Б заполнены несмешивающимися жидкостями различной ρ_1 и ρ_2 плотности (рис. 4.3.1). Давление в сосуде А равно p_1 , а в сосуде Б - p_2 . Проведем плоскость отсчета 0-0 через произвольно взятую точку М и составим уравнение равновесия:

$$p_1 + \rho_1 g z_1 = \rho_2 g z_2$$

или

$$p_1 - p_2 = \rho_2 g z_2 - \rho_1 g z_1, \quad (4.3.1)$$



Процессы и аппараты пищевых производств

где z_1 и z_2 – высоты уровней точки М относительно поверхности жидкости в сосудах А и Б.

Рассмотрим несколько частных случаев.

В сосудах находится жидкость плотностью ρ , сосуды либо открытые, либо закрытые, но давление в них одинаковое, т.е. $p_1 = p_2$.

Тогда из уравнения (4.3.1) $z_1 = z_2$

Таким образом, в сообщающихся сосудах, находящихся под одинаковым давлением и заполненных жидкостью с одинаковой плотностью, уровни ее располагаются на одной высоте независимо от формы и поперечного сечения сосудов.

Это свойство сообщающихся сосудов используют в технике для измерения уровня жидкости в аппаратах с помощью водомерных стекол.

Если сосуды заполнены одной и той же жидкостью, то давление в сосудах разное, то из (4.3.1) получим:

$$z_2 - z_1 = \frac{p_1 - p_2}{\rho g}$$

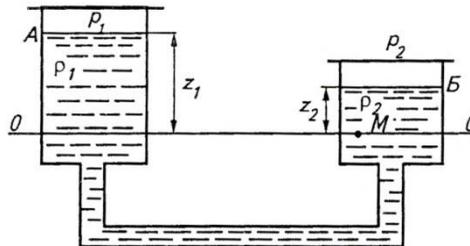


Рисунок 4.3.1 - Сообщающиеся сосуды

В сосуды, находящиеся под одинаковым давлением, залиты разнородные, несмешивающиеся жидкости разной плотности.

В этом случае из уравнения (4.3.1) получим: $z_1 / z_2 = p_2 / p_1$.

В сообщающихся сосудах высоты уровней разнородных жидкостей над поверхностью их раздела обратно пропорциональны плотностям.

Свойства сообщающихся сосудов используют для определения высоты гидравлического затвора в различных аппаратах. При разделении двух несмешивающихся жидкостей в сепараторе высота гидравлического затвора для вывода тяжелой жидкости.



Процессы и аппараты пищевых производств

$$z_2 = z_1 \rho_1 / \rho_2$$

где z_1 - высота уровня жидкости в сепараторе; ρ_2 - плотность тяжелой жидкости.

Гидравлический пресс. Гидравлические прессы широко применяют в пищевой промышленности для прессования и брикетирования различных материалов. Принцип работы гидравлических прессов заключается в пропорциональности силы давления площади поршня.

Если приложить некоторую силу P_1 к поршню диаметром d_1 и создать гидростатическое давление на поршень p , то согласно закону Паскаля это давление будет воздействовать на поршень большего диаметра d_2 (рис. 4.3.2).

Сила давления на поршень d_2 составит: $P_2 = p \pi d_2^2 / 4$,

а на поршень d_1 : $P_1 = p \pi d_1^2 / 4$.

Разделив первое уравнение на второе, получим:

$$P_2 / P_1 = d_2^2 / d_1^2$$

т.е. выигрыш в силе прямо пропорционален соотношению квадратов диаметров поршней (площадей).

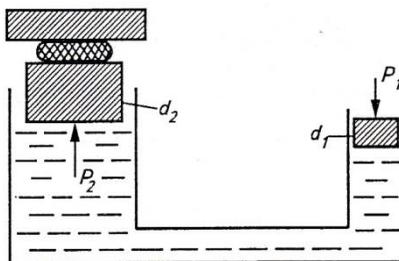


Рисунок 4.3.2 - Гидравлический пресс

Контрольные вопросы и задания:

- 1) Какие законы жидкостей изучает гидростатика?
- 2) Какими свойствами обладает капельная жидкость?
- 3) Какими свойствами обладает гидростатическое давление?



Процессы и аппараты пищевых производств

- 4) В каких единицах измерения выражается гидростатическое давление?
- 5) Запишите основное уравнение гидростатики.
- 6) Что выражает основное уравнение гидростатики?
- 7) Приведите пример случая относительного покоя жидкости во вращающихся сосудах.
- 8) Какие приборы используются для измерения давления?
- 9) В чем заключается принцип работы гидравлического пресса?



ЛЕКЦИЯ №5

ОСНОВЫ ГИДРАВЛИКИ. ГИДРОДИНАМИКА

5.1 Гидродинамика. Общие положения

Гидродинамика - раздел гидравлики, в котором изучаются законы движения жидкости и ее взаимодействие с неподвижными и подвижными поверхностями.

Движение жидкости по трубопроводам и каналам происходит под действием движущей силы – разности давлений, создаваемой с помощью насосов или компрессоров, либо вследствие разности уровней жидкости либо разности плотностей.

Основные понятия о движении жидкости. *Живым сечением* ω (м²) называют площадь поперечного сечения потока, перпендикулярную к направлению течения. Например, живое сечение трубы - круг (рис. 5.1.1, а); живое сечение клапана - кольцо с изменяющимся внутренним диаметром (рис. 5.1.1, б).

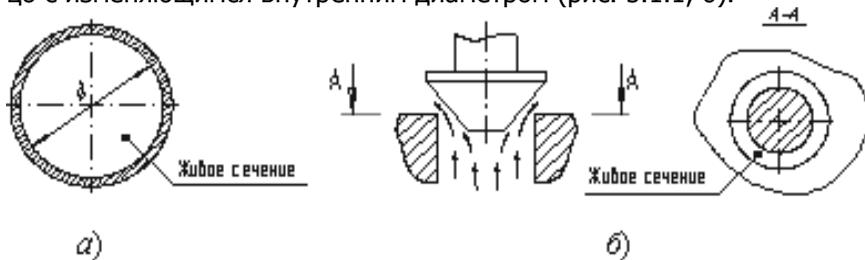


Рисунок 5.1.1 - Живые сечения: а - трубы, б - клапана

Смоченный периметр χ - часть периметра живого сечения, ограниченное твердыми стенками (рис. 5.1.2, выделен утолщенной линией).

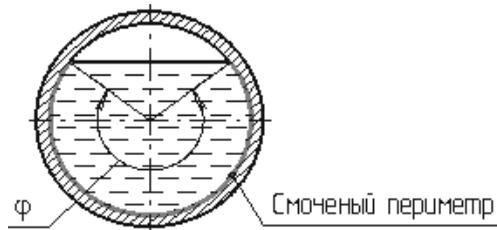


Рисунок 5.1.2 - Смоченный периметр

Для круглой трубы:

$$\chi = \pi D \frac{\varphi}{2\pi} = \frac{D\varphi}{2}, \text{ если угол в радианах,}$$



Процессы и аппараты пищевых производств

или

$$\chi = \pi D \frac{\varphi}{360^\circ}, \text{ если угол в градусах.}$$

Расход потока Q ($\text{м}^3/\text{с}$) - объем жидкости V , протекающей

$$Q = \frac{V}{t}$$

за единицу времени t через живое сечение ω :

Средняя скорость потока u ($\text{м}/\text{с}$) - скорость движения жидкости, определяемая отношением расхода жидкости Q к площади живого сечения ω :

$$u_{\text{ср}} = \frac{Q}{\omega}$$

Поскольку скорость движения различных частиц жидкости отличается друг от друга, поэтому скорость движения усредняется. В круглой трубе, например, скорость на оси трубы максимальна, тогда как у стенок трубы она равна нулю.

Гидравлический радиус потока R (м) – это отношение жи-

$$R = \frac{\omega}{\chi}$$

вого сечения к смоченному периметру:

Течение жидкости может быть установившимся и неуставившимся. *Установившимся* движением называется такое движение жидкости, при котором в данной точке русла давление и скорость не изменяются во времени:

$$\begin{aligned} u &= f(x, y, z) \\ P &= \varphi f(x, y, z) \end{aligned}$$

Движение, при котором скорость и давление изменяются не только от координат пространства, но и от времени, называется *неустановившимся* или нестационарным:

$$\begin{aligned} u &= f_1(x, y, z, t) \\ P &= \varphi f_1(x, y, z, t) \end{aligned}$$

Линия тока (применяется при неустановившемся движении) - это кривая, в каждой точке которой вектор скорости в данный момент времени направлен по касательной.

Трубка тока – это трубчатая поверхность, образуемая линиями тока с бесконечно малым поперечным сечением. Часть потока, заключенная внутри трубки тока называется *элементарной стружкой*.

Процессы и аппараты пищевых производств

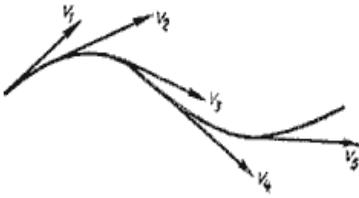


Рисунок 5.1.3 - Линия тока и элементарная струйка

Течение жидкости может быть напорным и безнапорным. *Напорное* течение наблюдается в закрытых руслах без свободной поверхности. Напорное течение наблюдается в трубопроводах с повышенным (пониженным) давлением. *Безнапорное* течение наблюдается в открытых руслах (реки, открытые каналы, лотки и т.п.). В данном курсе будет рассматриваться только напорное течение.

Из закона сохранения массы и уравнения постоянства расхода вытекает *уравнение неразрывности* потока. Представим трубу с переменным живым сечением (рис. 5.1.4). Расход жидкости через трубу в любом ее сечении постоянен, т.е. $Q_1=Q_2=const$, откуда:

$$\omega_1 v_1 = \omega_2 v_2$$

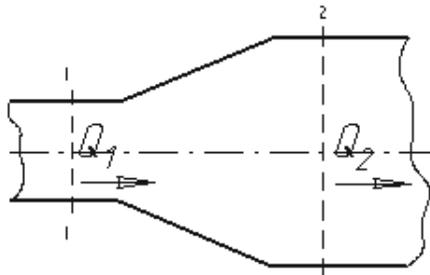


Рисунок 5.1.4 - Труба с переменным диаметром при постоянном расходе

Таким образом, если течение в трубе является сплошным и неразрывным, то уравнение неразрывности потока примет вид:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\omega_2}{\omega_1} = const$$

5.2 Уравнения Бернулли

Уравнения Бернулли для потока идеальной жидкости. Уравнение Даниила Бернулли, полученное в 1738 г., является фундаментальным уравнением

гидродинамики. Оно устанавливает связь между давлением P , средней скоростью u и пьезометрической высотой z в различных сечениях потока и выражает частный случай закона сохранения энергии и является уравнением энергетического баланса потока идеальной жидкости.

Рассмотрим трубопровод переменного диаметра, расположенный в пространстве под углом β (рис. 5.2.1).

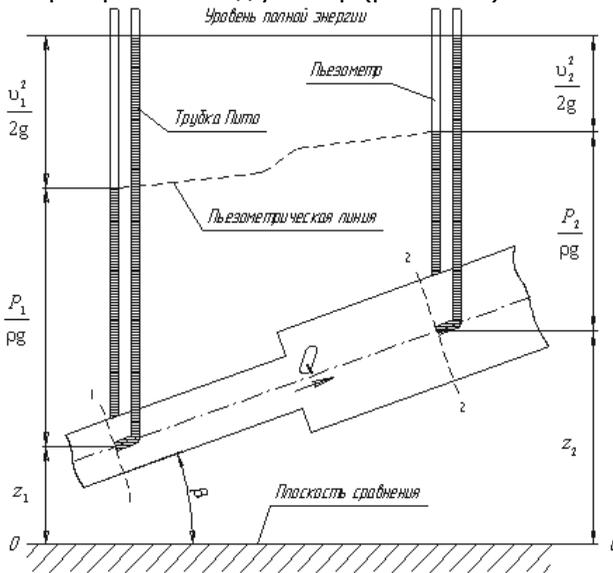


Рисунок 5.2.1 - Схема к выводу уравнения Бернулли для идеальной жидкости

Выберем произвольно на рассматриваемом участке трубопровода два сечения: сечение 1-1 и сечение 2-2. Вверх по трубопроводу от первого сечения ко второму движется жидкость, расход которой равен Q .

Для измерения давления жидкости применяют *пьезометры* - тонкостенные стеклянные трубки, в которых жидкость поднимается на высоту $\frac{P}{\rho g}$. В каждом сечении установлены пьезометры, в которых уровень жидкости поднимается на разные высоты.



Процессы и аппараты пищевых производств

Кроме пьезометров в каждом сечении $1-1$ и $2-2$ установлена трубка Пито, загнутый конец которой направлен навстречу потоку жидкости. Жидкость в трубках Пито также поднимается на разные уровни, если отсчитывать их от *пьезометрической линии*.

Пьезометрическую линию строят следующим образом. Между сечением $1-1$ и $2-2$ устанавливают несколько таких же пьезометров и через показания уровней жидкости в них проводят кривую и получают ломаную линию (рис. 5.2.1).

Однако высота уровней в трубках Пито относительно произвольной горизонтальной прямой $0-0$, называемой *плоскостью сравнения*, будет одинакова. Если через показания уровней жидкости в трубках Пито провести линию, то она будет горизонтальной и позволит отразить уровень полной энергии трубопровода.

Для двух произвольных сечений $1-1$ и $2-2$ потока идеальной жидкости уравнение Бернулли имеет следующий вид:

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} = H = \text{const}$$

Так как сечения $1-1$ и $2-2$ взяты произвольно, то полученное уравнение можно представить в виде:

$$z + \frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = H = \text{const} \quad (5.2.1)$$

Уравнение (5.2.1) - это уравнение Бернулли для потока идеальной жидкости. Сумма трех членов уравнения Бернулли для любого сечения потока идеальной жидкости есть величина постоянная.

С энергетической точки зрения каждый член уравнения представляет собой определенные виды энергии:

z_1 и z_2 - удельные энергии положения, характеризующие потенциальную энергию в сечениях $1-1$ и $2-2$; $\frac{P_1}{\rho g}$ и $\frac{P_2}{\rho g}$ - удельные энергии давления, характеризующие потенциальную энергию давления в тех же сечениях; $\frac{v_1^2}{2g}$ и $\frac{v_2^2}{2g}$ - удельные кинетические энергии в тех же сечениях.

Следовательно, согласно уравнению Бернулли, *полная удельная энергия идеальной жидкости в любом сечении постоянна*.

Уравнение Бернулли можно истолковать и с геометриче-



Процессы и аппараты пищевых производств

ской точки зрения. Дело в том, что каждый член уравнения имеет линейную размерность. Глядя на рис. 5.2.1, можно заметить, что z_1 и z_2 - геометрические высоты сечений 1-1 и 2-2 над плоскостью

$$\frac{P_1}{\rho g} \text{ и } \frac{P_2}{\rho g} \quad \frac{v_1^2}{2g} \text{ и } \frac{v_2^2}{2g}$$

сравнения; $\frac{P_1}{\rho g}$ и $\frac{P_2}{\rho g}$ - пьезометрические высоты; $\frac{v_1^2}{2g}$ и $\frac{v_2^2}{2g}$ - скоростные высоты в указанных сечениях.

В этом случае уравнение Бернулли можно прочесть так: сумма геометрической, пьезометрической и скоростной высоты для идеальной жидкости есть величина постоянная.

Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости. Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости несколько отличается от уравнения для потока идеальной жидкости.

Дело в том, что при движении реальной вязкой жидкости возникают силы трения, на преодоление которых расходуется часть энергии потока. В результате полная удельная энергия жидкости в сечении 1-1 будет больше полной удельной энергии в сечении 2-2 на величину потерянной энергии (рис. 5.2.2).

Потерянная энергия или потерянный напор обозначается $h_{\text{пот}}^{1-2}$ и имеют также линейную размерность.

Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости будет иметь вид:

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + h_{\text{пот}}^{1-2} = H = \text{const}$$

где α_1 и α_2 - коэффициенты Кориолиса, которые зависят от режима течения жидкости ($\alpha = 2$ для ламинарного режима, $\alpha = 1$ для турбулентного режима).

Потерянный напор $h_{\text{пот}}^{1-2}$ складывается из линейных потерь, вызванных силой трения между слоями жидкости, и потерь, вызванных местными сопротивлениями (изменениями конфигурации потока):

$$h_{\text{пот}}^{1-2} = h_{\text{лин}} + h_{\text{мест}}$$

Из рис. 5.2.2 видно, что по мере движения жидкости от сечения 1-1 до сечения 2-2 потерянный напор все время увеличивается (потерянный напор выделен вертикальной штриховкой). Таким образом, уровень первоначальной энергии, которой обладает жидкость в первом сечении, для второго сечения будет складываться из четырех составляющих: геометрической высоты, пьезометрической высоты, скоростной высоты и потерянного напора между сечениями 1-1 и 2-2.



Процессы и аппараты пищевых производств

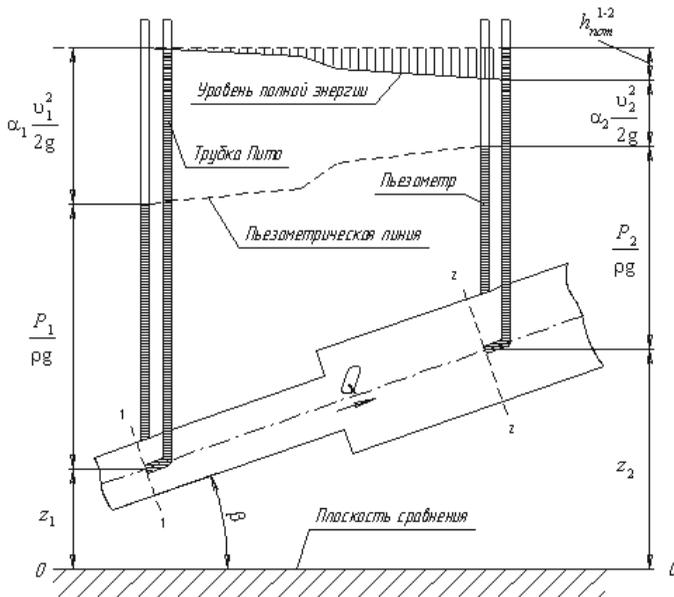


Рисунок 5.2.2 - Схема к выводу уравнения Бернулли для потока реальной жидкости

5.3 Практические приложения уравнения Бернулли

Для измерения скорости движущейся жидкости широко используется трубка Пито (рис. 5.3.1), загнутый конец которой направлен навстречу потоку. Пусть требуется измерить скорость жидкости в какой-то точке потока. Поместив конец трубки в указанную точку и составив уравнение Бернулли, для сечения 1-1 и сечения, проходящего на уровне жидкости в трубке Пито получим:

$$\frac{P_{атм} + \gamma h}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} = H + h + \frac{P_{атм}}{\gamma} \quad \text{или} \quad v = \sqrt{2gH}$$

где H - столб жидкости в трубке Пито.

Для измерения расхода жидкости в трубопроводах часто используют расходомер Вентури, состоящий из двух конических насадок с цилиндрической вставкой между ними (рис. 5.3.1). Если в сечениях I-I и II-II поставить пьезометры, то разность уровней в них будет зависеть от расхода жидкости, протекающей по трубе.

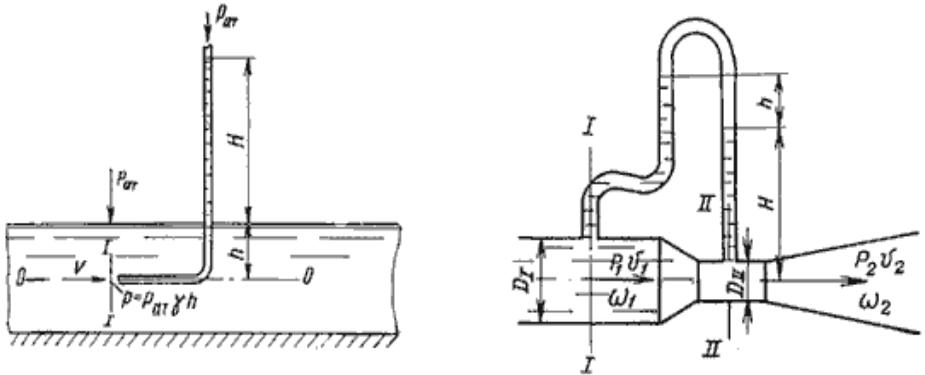


Рисунок 5.3.1 - Трубка Пито и расходомер Вентури

Пренебрегая потерями напора и считая $z_1 = z_2$, запишем уравнение Бернулли для сечений *I-I* и *II-II*:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g}$$

или

$$h = \frac{P_1 - P_2}{\gamma} = \frac{v_1^2}{2g} \left[-1 + \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right]$$

Используя уравнение неразрывности $Q = v_1 \omega_1 = v_2 \omega_2$ выражение примет вид:

$$h = \frac{Q^2}{2g\omega_1^2} \left[-1 + \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2 \right]$$

Решая относительно расхода жидкости Q , получим:

$$Q = \omega_1 \omega_2 \sqrt{\frac{2g}{\omega_1^2 - \omega_2^2}} \cdot \sqrt{h}$$

Выражение, стоящее перед \sqrt{h} , является постоянной величиной, носящей название постоянной расходомера Вентури.

Из полученного уравнения видно, что разность уровня h зависит от расхода жидкости Q . Часто эту зависимость строят в виде тарировочной кривой h от Q , которая имеет параболический характер.



Контрольные вопросы и задания:

- 1) Под действием каких сил жидкость движется по трубопроводам и каналам?
- 2) В чем отличие неустановившегося движения от установившегося?
- 3) В чем сущность закона неразрывности потока жидкости?
- 4) Какова физическая сущность уравнения Бернулли?
- 5) С помощью какого прибора можно определить скорость движения жидкости?
- 6) С помощью какого прибора можно определить расход жидкости?



ЛЕКЦИЯ №6

ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ.

РАЗДЕЛЕНИЕ НЕОДНОРОДНЫХ СИСТЕМ

6.1 Методы разделения неоднородных систем

Гидромеханика изучает равновесие, движение и взаимодействие жидкости с погруженными в нее или движущимися в ней телами. К гидромеханическим процессам относятся процессы осаждения взвешенных в жидкой или газообразной среде частиц под действием гравитационной силы (осаждение), центробежной силы (центробежное осаждение) или сил электрического поля; фильтрование жидкостей или газов через пористую перегородку под действием разности давлений (фильтрование и центробежное фильтрование); перемешивание в жидкой среде; псевдоожижение и др.

Классификация неоднородных систем. Неоднородными, или гетерогенными, называются системы, состоящие как минимум из двух фаз: дисперсной (внутренней), обычно находящейся в тонко раздробленном состоянии, и дисперсионной (внешней), окружающей частицы дисперсной фазы.

Суспензии состоят из жидкой дисперсионной и твердой дисперсной фаз. В зависимости от размера взвешенных частиц суспензии делятся на грубые с частицами размером >100 мкм; тонкие, когда размеры твердых частиц составляют $0.1...100$ мкм, и коллоидные растворы, содержащие твердые частицы размером < 0.1 мкм.

Эмульсии состоят из двух жидких фаз, не растворяющихся одна в другой: дисперсионной и дисперсной. Размер частиц дисперсной фазы может колебаться в значительных пределах. Под действием гравитационной силы эмульсии обычно расслаиваются, однако тонкие эмульсии с размером капель дисперсной фазы менее $0.4...0.5$ мкм, а также содержащие стабилизаторы, становятся устойчивыми и не расслаиваются в течение продолжительного времени.

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

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



Процессы и аппараты пищевых производств

Пыль и дым состоят из газовой дисперсионной фазы и твердой дисперсной фазы, Пыли образуются обычно при дроблении, смешивании и транспортировке твердых материалов. Размеры твердых частиц пыли составляют от 3 до 70 мкм. Дымы образуются при конденсации паров и газов при переходе их в жидкое или твердое состояние. Размер твердых частиц в дымах составляет 0.3...5 мкм.

Туманы состоят из газовой дисперсионной и жидкой дисперсной фаз. Туманы образуются при конденсации. Размер жидких капель в тумане 0.3...3 мкм. Пыли, туманы и дымы представляют собой аэрозоли.

В пищевых производствах часто возникает задача разделения неоднородных систем на составные части, например, при производстве вина требуется его осветление, т.е. отделение взвешенных твердых частиц от жидкой фазы; пивное сусло отделяют от дробины и т. д.

Основными методами разделения неоднородных систем в пищевой промышленности являются осаждение, фильтрование и центрифугирование.

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

Фильтрование - процесс разделения жидких и газовых неоднородных систем с использованием пористой перегородки способной пропускать жидкость и газ, но задерживающей взвешенные частицы. Фильтрование осуществляется под действием сил давления или центробежных сил. Соответственно различают просто фильтрование и центробежное фильтрование. Фильтрование более эффективно для разделения суспензий, эмульсий и пыли, чем осаждение.

6.2. Материальный баланс процессов разделения

Разделению подлежит неоднородная система из вещества a (дисперсионная фаза) и взвешенных частиц b (дисперсная фаза). Введем следующие обозначения: G_c - количество исходной смеси, кг; x_c - содержание вещества b в исходной смеси, массовый %; G_p - количество продукта, кг; x_p - содержание вещества b в очищенном продукте, массовый %; G_o - количество осадка, кг; x_o - содержание вещества b в осадке, массовый %; r_a и r_b -



Процессы и аппараты пищевых производств

плотности веществ а и в.

При отсутствии потерь веществ материальный баланс разделения можно представить так:

по общему количеству веществ: $G_c = G_n + G_o$;

по количеству взвешенных веществ (дисперсной фазе):

$G_c x_c = G_n x_n + G_o x_o$.

Совместное решение этих уравнений позволяет определить количество очищенного продукта:

$$G_n = G_c \frac{x_o - x_c}{x_o - x_n}$$

$$G_o = G_c \frac{x_c - x_n}{x_o - x_n}$$

и количество осадка:

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

Эффективность разделения характеризуется эффектом разделения:

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

6.3. Кинетика разделения неоднородных смесей

Кинетика осаждения. Рассмотрим движение частицы под действием гравитационной силы в вязкой среде (рис.6.3.1).

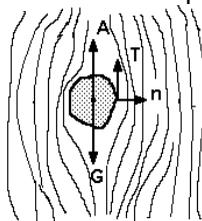


Рисунок 6.3.1 – Силы, действующие на частицу в вязкой среде

На частицу будут действовать сила тяжести G , архимедова сила A и сила трения T .

Объем частицы произвольной формы пропорционален ли-



Процессы и аппараты пищевых производств

нейному размеру в третьей степени:

$$V = k_1 l^3,$$

где k_1 - коэффициент формы частицы; l - характеристический размер частицы (диаметр).

Если плотность частицы ρ_T , а жидкости (газа, пара) $\rho_{ж}$, то на частицу действует сила тяжести $G = k_1 l^3 \rho_T g$ и подъемная сила $A = k_1 l^3 \rho_{ж} g$, направленная в сторону, противоположную направлению силы тяжести. Под действием разности этих сил частица перемещается в жидкости.

На единицу поверхности частицы со стороны жидкости действуют силы трения

$$T = \mu_{ж} \frac{dv}{dn}$$

где $\mu_{ж}$ - коэффициент вязкости жидкости; dv/dn - изменение скорости движения жидкости в направлении, нормальном к поверхности частицы.

Сумма сил трения T зависит от площади поверхности частицы $k_2 l^2$ (k_2 - коэффициент формы частицы) и составляет:

$$T = k_2 l^2 \mu_{ж} dv/dn$$

Согласно второму закону механики равнодействующая сил тяжести, подъемной и трения равна массе частицы, умноженной на ускорение:

$$k_1 l^3 (\rho_T - \rho_{ж}) g - k_2 l^2 \mu_{ж} dv/dn = k_1 l^3 \rho_T dv/dn \quad (6.3.1)$$

Это равенство является дифференциальным уравнением осаждения частицы в вязкой жидкости под действием силы тяжести. Уравнение не имеет решения в общем виде, поэтому для определения скорости осаждения частиц его необходимо преобразовать в критериальное уравнение.

Приведем полученное дифференциальное уравнение (6.3.1) к безразмерному виду, поделив на $k_1 l^3 \rho_T dv/dn$ и умножив на параметрический критерий $\rho_T / \rho_{ж}$:

$$g \frac{d\tau}{dv} \cdot \frac{(\rho_T - \rho_{ж}) \rho_T}{\rho_T \rho_{ж}} - \phi \frac{\mu_{ж} dv d\tau \rho_T}{l \rho_T dn dv \rho_{ж}} - \frac{\rho_T}{\rho_{ж}} = 0,$$

где $k_2 / k_1 = \phi$ - константа, зависящая от формы частицы.

Это дифференциальное уравнение представляют в виде критериального уравнения, описывающего процесс осаждения:

$$Re = A(\phi Ar)^n$$

где A - коэффициент; n - показатель степени, определя-



Процессы и аппараты пищевых производств

мый экспериментальным путем; $Ar = g(\rho_T - \rho_{жс}) \frac{l^3 \rho_{жс}}{\mu_{жс}^2}$ - критерий Архимеда, который характеризует отношение разности сил тяжести к подъемной силе; $Re = vl \frac{\rho_{жс}}{\mu_{жс}}$ - критерий Рейнольдса, который характеризует гидродинамическое подобие при обтекании частицы жидкостью.

Для каждого режима: ламинарного, переходного и турбулентного найдены коэффициенты A и n :

для ламинарного режима $Re \leq 0.2$

$$Re = \frac{1}{18} \phi Ar \quad \text{при } Re < 1,85 \text{ или } \phi Ar < 33;$$

для переходного режима $0.2 \leq Re \leq 500$

$$Re = 0,152(\phi Ar)^{0,175} \quad \text{при } 1,85 \leq Re \leq 500 \text{ или } 33 < \phi Ar < 83.103;$$

для турбулентного режима $Re > 500$

$$Re = 1,74(\phi Ar)^{0,5} \quad \text{при } Re > 500 \text{ или } \phi Ar > 83.103$$

По значению критерия Рейнольдса определяется скорость осаждения частицы в жидкости под действием силы тяжести:

$$v_0 = \frac{Re \mu_{жс}}{l \rho_{жс}}$$

В случае круглой частицы диаметром d и ламинарного движения скорость осаждения может быть определена по уравнению Стокса:

$$v_0 = \frac{1}{18} \frac{gd^2(\rho_T - \rho_{жс})}{\mu_{жс}}$$

В случае осаждения капель жидкости в жидкой среде процесс осложняется тем, что форма капель непрерывно меняется. Для определения скорости осаждения капель рекомендуется формула:

$$v_0 = \frac{gd^{2,5}}{\sigma} \left(\frac{\rho_T - \rho_c}{\rho_c} \right)^{1,5} \frac{\mu_-}{\rho_- g}$$

где d - усредненный диаметр капли; σ - поверхностное натяжение на границах образующих фаз; ρ_c - плотность среды; ρ_j - плотность жидкости, образующей капли; μ_j - вязкость среды.

Полученные кинетические закономерности процесса осаждения свидетельствуют о том, что скорость осаждения увеличива-



Процессы и аппараты пищевых производств

вается с увеличением размеров и плотности частиц и уменьшается с увеличением плотности и вязкости среды, в которой происходит осаждение.

Приведенные расчеты относятся к свободному отстаиванию, при котором оседающие частицы не мешают друг другу. На практике это не так. При стесненном отстаивании скорость оседания частиц ниже, чем при свободном.

Контрольные вопросы и задания:

- 1) Что такое гетерогенные системы?
- 2) Какие вы знаете гетерогенные системы?
- 3) Перечислите методы разделения гетерогенных систем.
- 4) Какие величины определяются из материального баланса процессов разделения?
- 5) Какие критерии гидродинамического подобия характеризуют процесс осаждения?
- 6) Как получено критериальное уравнение осаждения?
- 7) При каких режимах может происходить процесс осаждения?
- 8) Как зависит скорость осаждения от вязкости дисперсионной фазы и плотности дисперсной?



ЛЕКЦИЯ №7

ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ.

ОТСТАИВАНИЕ И ОСАЖДЕНИЕ

7.1 Отстаивание под действием гравитационного поля

Отстаивание - это частный случай разделения неоднородных жидких или газообразных систем в результате выделения твердых или жидких частиц под действием гравитационной силы. Отстаивание применяется для грубого разделения суспензий, эмульсий и характеризуется низкой скоростью процесса. Отстаиванием не удастся полностью разделить неоднородную смесь на дисперсную и дисперсионную фазы. Однако простое аппаратное оформление процесса и низкие энергетические затраты определили широкое применение этого метода разделения в пищевой и смежных отраслях промышленности.

Отстаивание проводится в аппаратах различных конструкций, называемых отстойниками. При отстаивании должны соблюдаться следующие условия: 1) продолжительность пребывания разделяемого потока в аппарате должна быть равна или больше времени осаждения частиц; 2) линейная скорость потока должна быть меньше скорости осаждения.

При нарушении первого условия частицы не успевают выделиться и осесть в аппарате, при нарушении второго, возникающие вихревые потоки взмучивают и уносят осаждающиеся частицы из отстойника.

Рассмотрим работу отстойника (рис.7.1.1)

В прямоугольный отстойник с размерами камеры l , h , b поступает на разделение смесь с линейной скоростью v . При движении суспензии в отстойнике происходит отстаивание: твердые частицы оседают на дно, образуя осадок.

Отстойники рассчитываются на отстаивание самых мелких частиц.



Процессы и аппараты пищевых производств

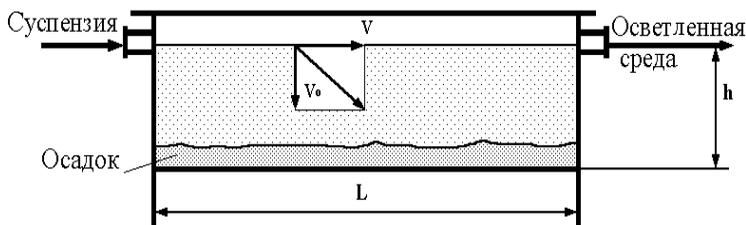


Рисунок 7.1.1 - К расчету производительности отстойника

Установим связь между производительностью отстойника и его размерами.

Рабочий объем отстойника: $V = lhb = V_{\tau} \tau_0$,

где V_{τ} - секундная производительность отстойника, м³/с;

τ_0 - средняя продолжительность отстаивания частиц, с.

Последняя связана со средней скоростью осаждения частиц v_0 соотношением:

$$\tau_0 = h / v_0$$

Удельная производительность отстойника:

$$V_{\tau} = l b v_0 \quad (7.1.1)$$

т.е. она равна произведению площади отстаивания ($F_0 = lb$) на скорость отстаивания v_0 . Скорость отстаивания определяется в зависимости от режима по формуле:

$$v_0 = \frac{Re \mu_{жс}}{l \rho_{жс}}$$

Продолжительность отстаивания можно сократить, если уменьшить высоту слоя жидкости (путь отстаивания). Это условие реализовано на конструкциях многоярусных отстойников и тарельчатых сепараторов.

Если задана производительность отстойника, то из уравнения (7.1.1) можно определить площадь поверхности отстаивания:

$$F_0 = V_{\tau} / v_0.$$

7.2 Осаждение под действием центробежной силы

С целью интенсификации разделения суспензий и эмульсий процесс осаждения проводится под действием центробежной силы. Для создания поля центробежных сил используются два технических приема: поток жидкости или газа вращается в неподвижном аппарате; поток поступает во вращающийся аппарат и вращается вместе с ним. В первом случае процесс называется



Процессы и аппараты пищевых производств

циклонным, а аппарат - циклоном, во втором случае - отстойным центрифугированием, а аппарат - отстойной центрифугой или сепаратором.

Во вращающемся потоке на взвешенную частицу действует центробежная сила, под действием которой частица движется от центра к стенке аппарата со скоростью, равной скорости осаждения. Центробежная сила:

$$G_{ц} = \frac{m\omega_r^2}{r},$$

где m - масса частицы, кг; ω_r - окружная скорость вращения, м/с; r - радиус вращения, м; окружная скорость вращения $\omega_r = \omega r = 2\pi nr/60$, ω - угловая скорость вращения, рад/с; n - частота вращения, мин⁻¹.

Эффективность разделения под действием силы тяжести и центробежной силы можно определить как:

$$\frac{G_{ц}}{G} = \frac{\omega_r^2}{gr} = K_{ц}$$

Величина $K_{ц}$ носит название *фактора разделения*. Фактор разделения является важной характеристикой центрифуги.

Расчет скорости осаждения в поле центробежных сил проводится по полученным в предыдущей лекции формулам, но вместо критерия Архимеда Ar , подставляется модифицированный критерий $Ar_m = K_{ц}Ar$

При ламинарном движении скорость центробежного осаждения можно определить из уравнения:

$$v_{ц} = \frac{d^2(\rho_m - \rho_{ж})\omega^2 r}{18\mu}$$

Но скорость осаждения можно определить как:

$$v_{ц} = \frac{dr}{d\tau},$$

так как центробежная сила, действующая на частицу, зависит от расстояния частицы от оси вращения. Следовательно,

$$d\tau = \frac{18\mu}{d^2(\rho_m - \rho_{ж})\omega^2} \frac{dr}{r}$$

Проведя интегрирование в пределах r_1 - r_2 , получим уравнение для определения продолжительности осаждения частиц



Процессы и аппараты пищевых производств

под действием центробежной силы при ламинарном движении:

$$\tau = \frac{18\mu}{d^2(\rho_m - \rho_{ж})\omega^2} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

Процесс разделения суспензий в отстойных центрифугах складывается из стадий осаждения твердых частиц на стенках барабана и уплотнения осадка.

Производительность осадительных центрифуг на практике ниже, чем полученная расчетным путем, так как, во-первых, производительность центрифуг снижается из-за отставания скорости вращения частиц жидкости от скорости вращения ротора центрифуги; во-вторых, из-за неравномерного течения жидкости вдоль ротора осевшие частицы смываются с его стенок; в-третьих, образующиеся вихревые потоки взмучивают частицы.

7.3 Оборудование для отстаивания и осаждения

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

Отстойники бывают периодического, непрерывного и полунепрерывного действия.

Отстойник периодического действия (7.1.1) представляет собой плоский бассейн без перемешивающих устройств. Суспензия отстаивается в нем необходимое время. Осветленный слой сливается, а осевший осадок (шлам) выгружается вручную. Для ускорения процесса иногда суспензию подогревают. Размеры и форма зависят от плотности и размеров частицы, и вязкости дисперсионной фазы.

В отстойниках полунепрерывного действия с наклонными перегородками (7.3.1) суспензия подается через штуцер и направляется с помощью наклонных перегородок попеременно сверху вниз и снизу вверх.

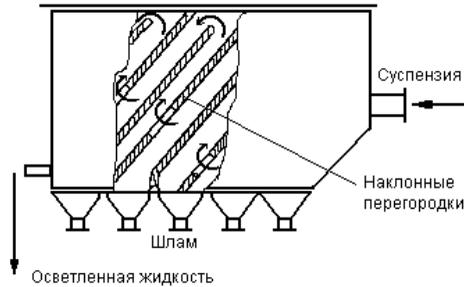


Рисунок 7.3.1 - Отстойник полунепрерывного действия с наклонными перегородками

Устройство перегородок увеличивает продолжительность пребывания суспензии и площадь поверхности отстаивания. Шлам собирается в конических бункерах и по мере накопления удаляется из них через краны. Осветленная жидкость отводится через верхний штуцер.

Непрерывно действующий отстойник с гребковой мешалкой (7.3.2) представляет собой цилиндрический резервуар 6 с коническим дном 5 и внутренним кольцевым желобом 1 вдоль верхнего края отстойника. Мешалка 2 с гребками 3 вращается со скоростью $0.02...0.5 \text{ мин}^{-1}$.

Суспензия непрерывно подается по трубе в середину резервуара. Осветленная жидкость сливается в кольцевой желоб и отводится из отстойника. Шлам удаляется при помощи диафрагменного насоса через люк 4. Удаления жидкости из шлама, если она является ценной для производственного процесса производится на установках с противоточной промывкой. В рассматриваемом отстойнике достигается равномерная плотность осадка, эффективное его обезвоживание. Недостаток - громоздкость.

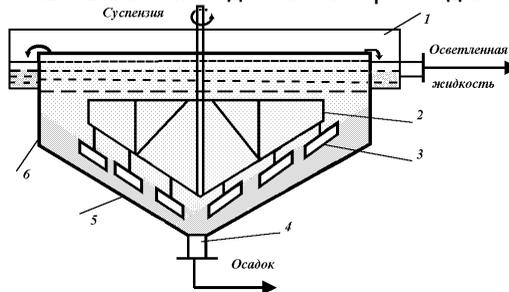


Рисунок 7.3.2 - Отстойник непрерывного действия с гребковой мешалкой



Процессы и аппараты пищевых производств

Отстойник для непрерывного разделения эмульсий (рис.7.3.3) состоит из нескольких частей. Эмульсия подается в левую часть отстойника, откуда поступает в среднюю сепарационную камеру. Перегородки позволяют регулировать высоту уровня смеси. В сепарационной части происходит разделение исходной смеси на составляющие под действием сил тяжести. Легкая жидкость поднимается и вытекает из отстойника через верхний штуцер.

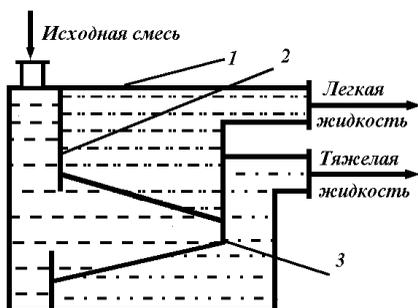


Рисунок 7.3.3 - Отстойник для разделения эмульсий:
1-корпус; 2-левая перегородка; 3-правая перегородка

Тяжелая жидкость опускается, проходит под правой перегородкой и вытекает через нижний штуцер. Каналы для выхода жидкости образуют сообщающиеся между собой сосуды

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

Отстойная центрифуга периодического действия с ручной выгрузкой осадка (рис.7.3.4) состоит из вращающегося барабана, помещенного в корпус. Под действием центробежной силы, возникающей при вращении барабана, твердые частицы осаждаются в виде сплошного осадка на стенке барабана, а осветленная жидкость переливается в кожух и удаляется через расположенный внизу патрубков. По окончании процесса осадок выгружается из центрифуги.



Процессы и аппараты пищевых производств

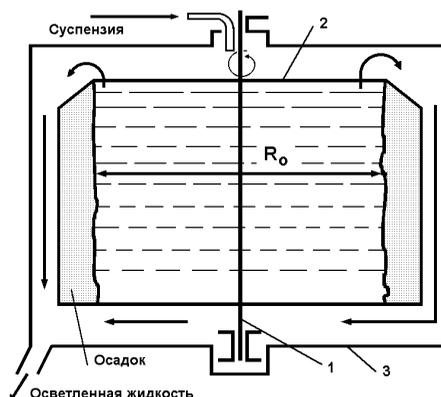


Рисунок 7.3.4 - Отстойная центрифуга: 1-вал; 2-барабан; 3-корпус

Непрерывно действующие отстойные горизонтальные центрифуги со шнековой выгрузкой осадка (НОГШ) применяются в крахмально-паточном производстве для получения концентрированного крахмального осадка и в других производствах.

Центрифуга (рис.7.3.5) состоит из ротора и внутреннего шнека, заключенных в корпус. Суспензия подается через центральную трубу в полый вал шнека. На выходе из этой трубы внутри шнека суспензия под действием центробежной силы распределяется в полости ротора. Ротор вращается в кожухе в полых цапфах, находящихся внутри цапф ротора. Под действием центробежной силы твердые частицы отбрасываются к стенкам ротора, а жидкость образует внутреннее кольцо, толщина которого определяется положением сливных отверстий на торце ротора. Осадок перемещается вследствие отставания скорости вращения шнека от скорости вращения ротора к отверстиям в роторе, через которые он выводится в камеру и удаляется из центрифуги. При движении вдоль ротора осадок уплотняется. При необходимости он может быть промыт. Осветленная жидкость отводится через сливные отверстия в камеру фильтрата и удаляется через патрубок. За счет изменения частоты вращения ротора и шнека можно регулировать режим работы центрифуги, изменяя продолжительность отстаивания и выгрузки осадка.



Процессы и аппараты пищевых производств

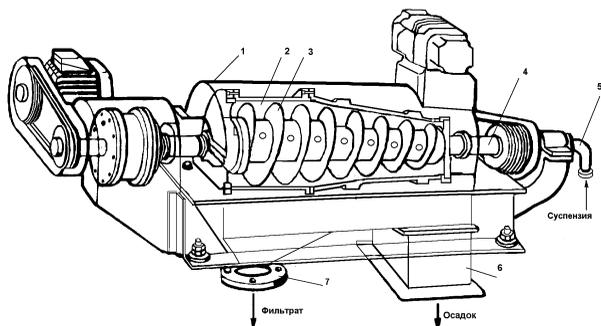


Рисунок 7.3.5 - Непрерывно действующая отстойная горизонтальная центрифуга со шнековой выгрузкой осадка: 1-корпус; 2-ротор; 3-шнековое устройство; 4-полюй вал; 5-центральная труба; 6-камера осадка; 7-патрубок для фильтрата

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

Производительность отстойных центрифуг определяется скоростью осаждения в роторе центрифуги и описывается формулой:

$$V_{\tau \square} = \eta F' v_{ц}$$

где η - коэффициент пропорциональности; $F' = 2\pi R_0 L$ - площадь поверхности суспензии в аппарате; R_0 - внутренний радиус кольцевого слоя суспензии; L - длина барабана;

$v_{ц} = v_0 K_{ц}$ - скорость центробежного осаждения; v_0 - скорость гравитационного осаждения;

$K_{ц}$ - фактор разделения.

Из последнего уравнения получено выражение для расчета производительности отстойных центрифуг с ножевым съемом осадка:

$$V_{\tau \square} = 25,3\eta L n^2 R_0^2 v_0 k$$

где k - отношение продолжительности подачи суспензии к общему объему времени работы центрифуги.

Производительность центрифуги НОГШ по суспензии в м³/ч:

$$V_{\tau \square} = 3,5 D_{сл}^2 L_{сл} (\rho_{T \square} - \rho_{жс}) d^2 n^2 / \mu$$

где $D_{сл}$, $L_{сл}$ - соответственно диаметр и длина сливного цилиндра, м; $\rho_{T \square}$, $\rho_{жс}$ - плотность соответственно частиц и среды,



Процессы и аппараты пищевых производств

кг/м³; d - наименьший диаметр частиц, м; n - частота вращения ротора, мин-1 ; μ - динамический коэффициент вязкости, Па·с.

Сепараторы применяются для разделения тонкодисперсных суспензий и эмульсий. Обеспечивают эффективное отделение дрожжей от сброженной бражки, тонкое осветление виноматериалов, обезжиривание молока и др.

Тарельчатый дрожжевой сепаратор с внутренними соплами (рис.7.3.6) состоит из барабана и пакета тарелок, заключенных в корпус, который смонтирован на общей раме с электродвигателем. Вал, с насаженными на него тарелками, приводится во вращение электродвигателем через ременную передачу. Сепаратор снабжен клапанами для его безразборной промывки. Клапаны автоматически открываются при снижении частоты вращения за счет накопления осадка. Вход суспензии осуществляется по внешней кольцевой трубе. Суспензия поступает под нижнюю перфорированную тарелку, достигает под действием центробежной силы нижней поверхности тарелки, частично разделяется и поступает в межтарельчатое пространство вышерасположенной тарелки. Пакет сепарационных тарелок увеличивает эффект сепарирования за счет сокращения пути свободного осаждения дрожжевых частиц. Если дрожжевая частица достигла нижней поверхности тарелки, то можно считать, что она практически выделилась из смеси. Осевшие частицы дрожжей через внутренние сопла поступают во внутреннюю кольцевую трубу и выводятся из сепаратора.

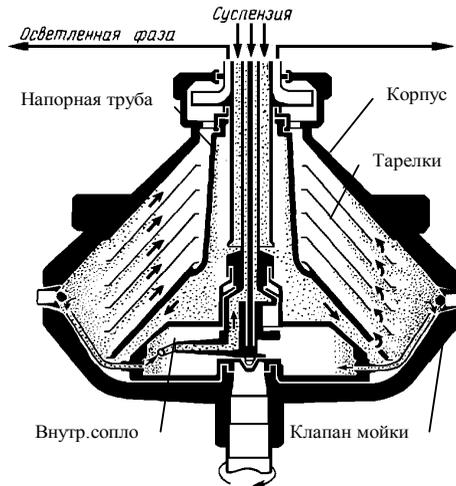


Рисунок 7.3.6 - Дрожжевой сепаратор



Процессы и аппараты пищевых производств

Имеются конструкции саморазгружающихся сепараторов. Осадок в них выгружается через определенные промежутки времени без остановки сепаратора. Это достигается перемещением внутреннего дна сепаратора по вертикали вниз. При этом открывается кольцевая щель, через которую под действием центробежной силы выгружаются твердые частицы.

Производительность молочного сепаратора (в м³/ч) можно определить по формуле:

$$V_{\tau} = 221,4 \eta d_c^2 n^2 z t g \alpha (R_B^3 - R_{BH}^3) t,$$

где η - КПД сепаратора ($\eta = 0.5 \dots 0.7$); d_c - диаметр частиц жира, м; n - частота вращения. $c-1$; z - число тарелок; α - угол наклона тарелок ($\alpha = 45 \dots 55^\circ$); R_B , R_{BH} - соответственно внешний и внутренний радиусы тарелок, м; t - температура сепарирования, ($t = 40 \dots 500^\circ\text{C}$).

Гидроциклоны применяются для осветления, обогащения суспензий, классификации твердых частиц по размерам от 5 до 150 мкм, а также для очистки сточных вод после мойки пищевых агрегатов (рис.7.3.7). Корпус гидроциклона состоит из верхней цилиндрической части и конического днища. Качество разделения в гидроциклонах зависит от угла конусности. Оптимальным считают угол, равный $10 \dots 15^\circ$. При таком угле удлиняется коническая часть гидроциклона и путь твердых частиц, следовательно, увеличивается время пребывания и качество разделения.

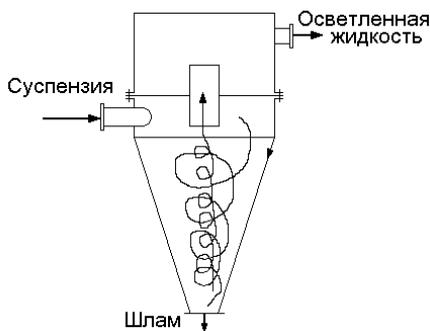


Рисунок 7.3.7 – Гидроциклон

Суспензия подается тангенциально в цилиндрическую часть и приобретает вращательное движение. Скорость суспензии на входе в гидроциклон составляет $5 \dots 25$ м/с. Под действием центробежной силы твердые частицы отбрасываются к стенкам и



Процессы и аппараты пищевых производств

движутся по спиральной траектории вдоль стенок вниз к штуцеру для вывода шлама. Осветленная жидкость движется в спиральном потоке вверх и удаляется через патрубок.

Гидроциклоны, применяемые в качестве классификаторов, имеют диаметр 300...350 мм и высоту 1...1.2 м. Для сгущения грубых суспензий используются гидроциклоны диаметром 100 мм, для сгущения и осветления тонких суспензий гидроциклоны диаметром 10...15 мм, обычно объединяемые в общий агрегат, в котором они работают параллельно (мультигидроциклон).

Производительность гидроциклона ($\text{м}^3/\text{ч}$) может быть определена по формуле:

$$V_{\tau} = 3,19d_{\text{сл}}D\sqrt{\Delta p},$$

где $d_{\text{сл}}$ - диаметр сливного патрубка, м; D - диаметр цилиндрической части, м; Δp - перепад давления в циклоне, Па.

Сверхцентрифуги (рис.7.3.8) имеют ротор малого диаметра - не более 200 мм, вращаются с большой скоростью до 4500 об/мин. Фактор разделения составляет до 15000. В таких центрифугах разделяют очень тонкодисперсные суспензии и эмульсии (обезжиривание молока).

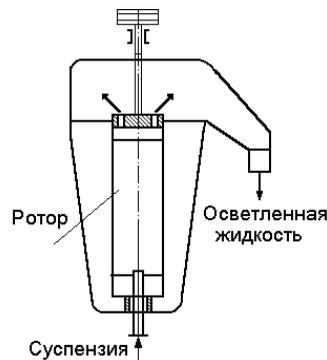


Рисунок 7.3.8 – Сверхцентрифуга



Контрольные вопросы и задания:

- 1) Какие неоднородные системы разделяют методом отстаивания?
- 2) В чем заключается расчет отстойников?
- 3) Что является движущей силой в отстойниках, центрифугах, сепараторах и гидроциклонах?
- 4) Какими методами можно повысить эффективность разделения неоднородных смесей по сравнению с отстаиванием?
- 5) Какими факторами определяется эффективность разделения в поле центробежных сил?
- 6) Какое оборудование применяется для разделения неоднородных смесей?
- 7) Отстойники каких конструкций используются для разделения суспензий?



ЛЕКЦИЯ №8

ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ.

ФИЛЬТРОВАНИЕ

8.1. Фильтрация. Общие сведения

Фильтрацией называется процесс разделения неоднородных систем через пористую перегородку, способную пропускать жидкость или газ, но задерживать взвешенные в них частицы (фильтрация в отличие от фильтрования - это движение жидкости или газа сквозь пористую среду, например просачивание воды сквозь грунт основания плотины). Фильтрация осуществляется под действием разности давлений на фильтрующей перегородке или в поле центробежных сил.

Интенсивность фильтрования зависит от качества суспензий, полученных на предыдущих стадиях технологического процесса: дисперсной системы с пониженным сопротивлением осадка, без смолистых, слизистых и коллоидных веществ.

При разделении неоднородных систем фильтрацией возникает необходимость выбора конструкции фильтра или фильтрующей центрифуги, фильтровальной перегородки, режима фильтрования.

По целевому назначению процесс фильтрования может быть очистным или продуктовым.

Очистное фильтрование применяется для разделения суспензий, очистки растворов от различного рода включений. В этом случае целевым продуктом является фильтрат. В пищевой промышленности очистное фильтрование применяется для осветления вина, виноматериалов, молока, пива и других продуктов.

Назначением *продуктового фильтрования* является выделение из суспензии или пыли диспергированных в них продуктов в виде осадка. Целевым продуктом является осадок. Примером такого фильтрования является разделение дрожжевых суспензий.

Виды фильтрования. При разделении суспензий в зависимости от вида фильтровальной перегородки и свойств самой суспензии фильтрование может происходить с образованием осадка на поверхности перегородки, с закупориванием пор фильтрующей перегородки и с тем -и другим явлениями одновременно (промежуточный вид фильтрования).

Фильтрация с образованием осадка на поверхности фильтрующей перегородки имеет место, когда диаметр твердых частиц больше диаметра пор перегородки. В этом случае твердые



Процессы и аппараты пищевых производств

частицы находятся на поверхности фильтрующей перегородки. Этот способ осуществим при концентрации твердой фазы суспензии более 1 массового %, когда создаются благоприятные условия для образования сводов над входами в поры фильтровальной перегородки. Образование сводов способствует увеличению скорости осаждения и концентрации твердой фазы в суспензии.

Фильтрация с закупориванием пор происходит, когда твердые частицы проникают в поры фильтровальной перегородки. Закупоривание пор твердыми частицами наблюдается в начальный период процесса фильтрации, что снижает производительность фильтра. Для поддержания его на должном уровне фильтр регенерируют, промывая обратным током жидкости либо прокаливая металлические фильтровальные перегородки.

Промежуточный вид фильтрации имеет место в случае одновременного закупоривания пор фильтровальной перегородки и отложения осадка на поверхности фильтровальной перегородки.

Для повышения скорости фильтрации при разделении суспензий с небольшой концентрацией твердой фазы, либо содержащих слизистые вещества, фильтрацию производят в присутствии вспомогательных веществ, препятствующих закупориванию пор перегородки. Слой вспомогательного вещества наносят на фильтровальную перегородку перед фильтрацией суспензии. В качестве вспомогательных веществ используют тонкодисперсные угли, перлит, кизельгур, фиброфло и другие материалы.

8.2. Движущая сила и скорость процесса

Движущей силой процесса фильтрации является разность давлений по обе стороны фильтровальной перегородки либо центробежная сила. Разность давлений можно получить разными способами: созданием избыточного давления над фильтровальной перегородкой либо подсоединением пространства под фильтровальной перегородкой к вакуумной линии. В этих случаях фильтрация происходит при постоянном перепаде давлений, и скорость процесса, прямо пропорциональна разности давлений и обратно пропорциональна сопротивлению осадка описывается уравнением

$$\frac{dV}{Fd\tau} = \frac{\Delta p}{\mu(R_0 + R_{тм.}),} \quad (8.2.1)$$



Процессы и аппараты пищевых производств

где V - объем фильтрата, м³; F - площадь поверхности фильтрования, м²; τ - продолжительность фильтрования, с; Δp - перепад давлений, н/м²; μ - вязкость жидкой фазы, н.с/м²; R_0 и $R_{ф.п.}$ - сопротивление соответственно осадка и фильтровальной перегородки, м⁻¹.

Примем, что при прохождении 1 м³ фильтрата образуется x_0 осадка, тогда:

$$x_0 V = h_0 F,$$

где h_0 - высота слоя осадка, м,
откуда:

$$h_0 = x_0 V / F$$

Допустим, что сопротивление слоя осадка пропорционально его высоте:

$$R_0 = r_0 h_0 = r_0 x_0 V / F$$

где r_0 - удельное сопротивление осадка, м⁻².

Подставим полученное соотношение в уравнение (8.2.1):

$$\frac{dV}{F d\tau} = \frac{\Delta p}{\mu (r_0 x_0 V / F + R_{ф.п.})} \quad (8.2.2)$$

и, пренебрегая сопротивлением фильтровальной перегородки, получим:

$$r_0 = \frac{\Delta p}{\mu h_0 v}, \quad (8.2.3)$$

где v - скорость фильтрования, м/с

Для начального момента фильтрования при $V=0$, $R_{ф.п.} = \Delta p / (\mu v)$.

Для случая фильтрования при $\Delta p = \text{const}$ из уравнения (8.2.2) после его интегрирования в пределах $0 - V$ и $0 - \tau$ получим:

$$V^2 + 2 \frac{R_{ф.п.} F}{r_0 x_0} V = 2 \frac{\Delta p F^2}{\mu r_0 x_0} \tau \quad (8.2.4)$$

Решив уравнение (8.2.4) относительно продолжительности фильтрования τ , получим:

$$\tau = \frac{\mu r_0}{2 \Delta p x_0} h_0^2 + \frac{R_{ф.п.}}{\Delta p x_0} h_0$$

Решив уравнение (8.2.4) относительно удельной производительности фильтра $V_f = V / F$ (м³/м²), получим:



Процессы и аппараты пищевых производств

$$V_f = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\mu r_0 x_0} \tau + \left(\frac{R_{\phi.n.}}{r_0 x_0}\right)^2} - \frac{R_{\phi.n.}}{r_0 x_0}$$

Для случая фильтрования при $v = \text{const}$ из уравнения (8.2.2) после интегрирования и преобразований получим продолжительность фильтрования:

$$\tau = \frac{\mu x_0 r_0}{\Delta p} \left(\frac{V}{F}\right)^2 + \frac{R_{\phi.n.} \mu}{\Delta p} \frac{V}{F}$$

и удельную производительность фильтра, м³/м²:

$$V_f = \sqrt{\frac{\Delta p}{\mu r_0 x_0} \tau + \left(\frac{R_{\phi.n.}}{2r_0 x_0}\right)^2} - \frac{R_{\phi.n.}}{2r_0 x_0}$$

Фильтрование под действием центробежной силы проводится в фильтрующих центрифугах. Фильтрующая центрифуга в отличие от отстойной имеет перфорированный барабан, обтянутый внутри фильтровальной тканью. Суспензия под действием центробежной силы отбрасывается на фильтровальную ткань. Дисперсионная жидкая фаза фильтруется через ткань, фильтрат выводится из центрифуги, а взвешенные частицы задерживаются на фильтровальной ткани, образуя осадок.

Процесс фильтрования можно разделить на три периода: образование осадка, его уплотнение и отжим.

При центробежном фильтровании на массу элементарного кольца действует центробежная сила

$$dG_{ц} = dm \omega^2 r$$

где m - масса элементарного кольца, кг; ω - угловая скорость, с⁻¹; r - расстояние кольца от оси вращения, м.

Отношение центробежной силы к силе тяжести, как было указано выше, является фактором разделения, характеризующим эффективность разделения суспензии в центрифуге. Фактор разделения растет пропорционально квадрату частоты вращения барабана.

Производительность фильтрующих центрифуг рассчитывается на основании теории фильтрования. Движущая сила процесса, действующая на элементарный объем суспензии, определяется по формуле



Процессы и аппараты пищевых производств

$$dp_u = dG_u / F = fdr\rho_c\omega^2r / F = \rho_c\omega^2rdr,$$

где ρ_c - плотность суспензии, кг/м³.

Движущую силу найдем, проинтегрировав полученное уравнение в пределах от R_0 до R

$$\Delta p_{ц} = \rho_c\omega^2(R^2 - R_0^2)/2$$

Скорость центробежного фильтрования:

$$v_u = 0,5 \frac{\rho_c\omega^2(R^2 - R_0^2)}{R_{ф.п.} + r_0x_0},$$

где x_0 – толщина слоя осадка, которая для непрерывно действующих центрифуг не изменяется во времени; R R_0 – соответственно внешний и внутренний радиусы барабана центрифуги.

Следует отметить, что полученные зависимости являются приближенными, так как не учитывают осаждение твердых частиц под действием гравитационных сил, благодаря чему слой осадка растет быстрее, чем отбираемый фильтрат; кроме того, осадки на фильтровальной перегородке сжимаются под действием перепада давлений и их сопротивление растет быстрее, чем высота слоя осадка.

На практике отношение объема осадка к объему фильтрата x_0 , удельное объемное сопротивление осадка r_0 и сопротивление фильтровальной перегородки $R_{ф.п.}$ определяются экспериментально.

8.3 Оборудование для фильтрования и его расчет

По принципу действия фильтровальное оборудование делится на оборудование, работающее при постоянном перепаде давления либо при постоянной скорости фильтрования; по способу создания перепада давления на фильтровальной перегородке - на работающие под вакуумом либо под избыточным давлением; в зависимости от организации процесса - на оборудование непрерывного действия и периодического действия.

Избыточное давление может создаваться силами давления или центробежной силой. В зависимости от способа создания перепада давления фильтровальное оборудование может быть разделено на фильтры и центрифуги.

Фильтры, используемые для разделения суспензии, работают как под вакуумом, так и под избыточным давлением, периодически и непрерывно. К фильтрам, работающим под давле-



Процессы и аппараты пищевых производств

нием, предъявляются повышенные требования к механической прочности.

В фильтрах периодического действия осадок удаляется после прекращения фильтрования, в фильтрах непрерывного действия - по мере необходимости без остановки процесса.

При разработке новых видов фильтровального оборудования следует ориентироваться на создание компактных аппаратов с развитой фильтровальной поверхностью с автоматической системой управления процессом. Рассмотрим несколько примеров фильтров.

Нутч - фильтр (рис. 8.3.1), работающий как под вакуумом, так и под избыточным давлением, широко распространен в малотоннажном производстве. Выгрузка из него осадка механизирована. Для сброса осадка фильтр снабжен перемешивающим устройством в виде однолопастной мешалки. Для удаления осадка из фильтра на цилиндрической части корпуса предусмотрен люк, расположенный на цилиндрической части корпуса

Суспензия и сжатый воздух подаются через отдельные штуцера, фильтрат удаляется через спускной клапан. Фильтр снабжен предохранительным клапаном.

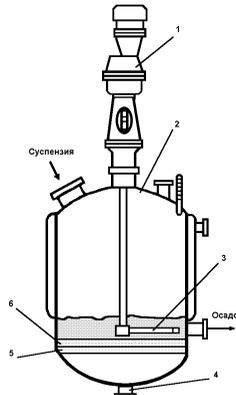


Рисунок 8.3.1 - Нутч-фильтр с перемешивающим устройством:
1-привод; 2-корпус фильтра; 3-мешалка; 4-спускной кран;
5-фильтровальная перегородка; 6-фильтровальная ткань

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



Процессы и аппараты пищевых производств

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

Барабанные вакуум - фильтры применяют для непрерывного разделения суспензий концентрацией 50...500 кг/м³. Твердые частицы могут иметь кристаллическую, волокнистую, аморфную, коллоидальную структуру. Производительность фильтра зависит от структуры твердых частиц и снижается в указанной выше последовательности.

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

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

Для извлечения пива и дрожжей из дрожжевой суспензии, образующейся при седиментации в бродильных чанах и танках, применяется барабанный вакуум-фильтр (рис.8.3.2). Фильтровальный элемент состоит из крупноячеистой сетки, на которую накладывается мелкоячеистая сетка. Для улучшения условий фильтрования на мелкоячеистую сетку намывается слой вспомогательного материала - кизельгура либо картофельного крахмала. Пивная или дрожжевая суспензия, подаваемая из бака, при вращении барабана равномерно распределяется по фильтровальной

Процессы и аппараты пищевых производств

поверхности, а дрожжевой осадок (лепешка) срезается ножом, установленным над баком. Содержание сухих веществ в дрожжевой лепешке достигает 25...28 %. Обрызгивание подсыхающей лепешки водой увеличивает выход пива примерно на 20 %.

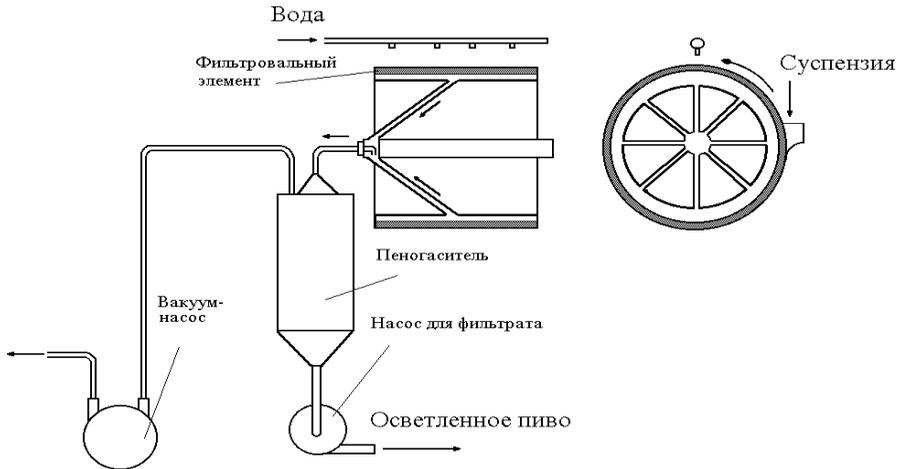


Рисунок 8.3.2 - Барабанный вакуум-фильтр

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

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

В *саморазгружающихся центрифугах* (рис.8.3.3) осадок удаляется под действием гравитационной силы. Такие центрифуги выполняются с вертикальным валом, на котором располагается перфорированный барабан. Суспензия подается на загрузочный диск при вращении барабана с низкой частотой. Нижняя часть барабана имеет коническую форму, причем угол наклона делается большим чем угол естественного откоса осадка. После окончания цикла фильтрования и остановки барабана под действием гравитационной силы осадок сползает со стенок барабана и удаляется из центрифуги через нижний люк.

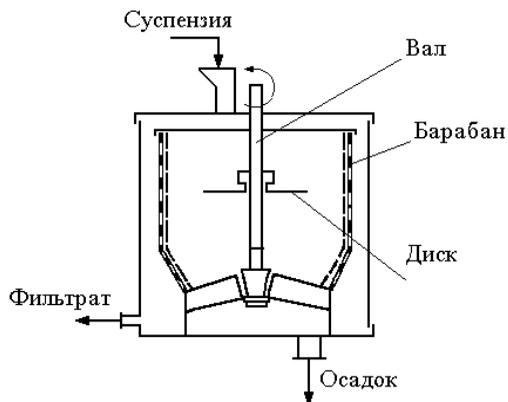


Рисунок 8.3.3 - Центрифуга с гравитационной выгрузкой осадка

В непрерывно действующих фильтрующих центрифугах с пульсирующей выгрузкой осадка (рис.8.3.4) фильтрат из центрифуги выводится непрерывно, а осадок периодически выгружается из барабана поршнем. Поршень толкатель перемещается в горизонтальном направлении с помощью штока, который находится внутри полого вала барабана. Шток вращается вместе с валом и совершает одновременно воз-вратно-поступательные движения (10-12 ходов в мин.), длина каждого хода составляет примерно 0,1 длины барабана.

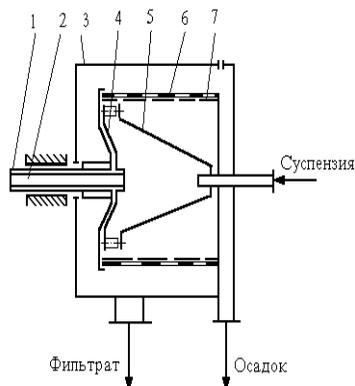


Рисунок 8.3.4 - Фильтрующих центрифугах с пульсирующей выгрузкой осадка: 1-полый вал; 2-шток; 3-корпус; 4-поршень-толкатель; 5-приемный конус; 6-барабан; 7-сито



Процессы и аппараты пищевых производств

Направление движения поршня изменяется автоматически. Суспензия подводится по оси вала в приемный конус. В конусе имеются отверстия, по которым суспензия поступает в барабан. Внутренняя поверхность барабана покрыта фильтровальным ситом. Осадок, отложившийся на поверхности сита, промывается и перемещается поршнем к открытому концу барабана. Из барабана осадок выгружается в камеру для осадка.

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

Расчет фильтровального оборудования периодического действия заключается в определении количества аппаратов для обеспечения заданной производительности в сутки по фильтрату. Для этого выбирают или рассчитывают площадь поверхности фильтрования и производительность одного аппарата.

Продолжительность фильтрования при $\Delta p = const$:

$$\tau_{осн} = \tau_{всп} + 2 \sqrt{\frac{\mu R_{ф.п.}^2}{2 \Delta p r_0 x_0}} \tau_{всп}$$

где $\tau_{осн}$ - продолжительность собственно фильтрования;
 $\tau_{всп}$ - продолжительность вспомогательных операций (подготовка аппарата к работе, загрузка суспензии, удаление осадка);

r_0, x_0 - экспериментальные параметры.

Наибольшая производительность аппарата периодического действия при значительном сопротивлении фильтровальной перегородки достигается при

$\tau_{осн} > \tau_{всп}$. Для ориентировочного расчета оптимальной продолжительности цикла можно пользоваться зависимостью (для $\Delta p = const, R_{ф.п.} = 0$)

$$\tau_{осн} = (4..6) \tau_{всп}$$

Производительность центрифуги по суспензии за один цикл (в кг):

$$V_p = \pi(D^2 - D_0^2)L/4$$

где D, D_0 - соответственно внешний и внутренний диаметр



Процессы и аппараты пищевых производств

ры барабана.

Число циклов работы фильтровальной установки в сутки:

$$n_{\text{общ}} = \frac{Q_{\text{общ}}}{V},$$

Число циклов работы одного аппарата в сутки:

$$n_1 = \frac{24 \cdot 3600}{\tau_{\text{осн}} + \tau_{\text{всп}}}$$

Необходимое количество фильтров $\Phi = n_{\text{общ}} / n_1$

Расчет фильтровального оборудования непрерывного действия при заданной или принятой площади поверхности фильтрования сводится к определению по заданной производительности скорости перемещения поверхности фильтрования, а также необходимого числа аппаратов для обеспечения заданной производительности.

На основании экспериментальных данных принимают наименьшую толщину осадка, чтобы обеспечить максимальную производительность.

Продолжительность фильтрования для получения слоя осадка заданной толщины можно определить из выражения при $R_{\text{ф.п}} = 0$:

$$\tau = \frac{\mu r_0 h_0^2}{2x_0 \Delta p}$$

На основании экспериментальных или расчетных данных определяют продолжительность промывки осадка, общую производительность аппарата.

Производительность по фильтрату при центробежном фильтровании

$$V_{\tau} = \pi D L v_{\tau},$$

где v_{τ} - скорость центробежного фильтрования, определяемая по формуле.

Число аппаратов для обеспечения заданной производительности $Q_{\text{общ}}$ определяют из соотношения

$$\Phi = Q_{\text{общ}} / Q_i$$

где Q_i – производительность одного аппарата.



Контрольные вопросы и задания:

- 1) Какие неоднородные системы разделяют фильтрованием?
- 2) Какие виды фильтрования существуют?
- 3) Что является движущей силой фильтрования?
- 4) Какое оборудование применяется для разделения неоднородных систем методом фильтрования?
- 5) В чем заключается расчет фильтровального оборудования периодического и непрерывного действия?
- 6) Дайте сравнительную оценку эффективности фильтрования в фильтрах и фильтрующих центрифугах.



ЛЕКЦИЯ №9

ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ.

ПСЕВДООЖИЖЕНИЕ

9.1 Псевдоожигение. Общие сведения

Псевдоожигением называется такое состояние двухфазной системы твердые частицы - газ (или жидкость), которое характеризуется перемещением твердых частиц относительно друг друга за счет подвода энергии от какого-либо источника. Псевдоожигенная система, возникшая под воздействием ожигающего агента, получила название псевдоожигенного, или кипящего, слоя, так как этому слою присущи многие свойства капельной жидкости. Если источником энергии является вибрация, то говорят о виброожигении.

Псевдоожигенный слой образуется при восходящем движении ожигающего агента (или при наличии вертикальной составляющей вибрационного воздействия) через слой зернистого материала со скоростью, позволяющей поддерживать слой материала во взвешенном состоянии. При вибрационном воздействии, вертикальный вектор силового воздействия должен быть больше или равен весу частицы, чтобы она могла находиться во взвешенном состоянии некоторое время.

За последнее время процессы в псевдоожигенном слое получили широкое распространение во многих отраслях промышленности. В псевдоожигенном слое проводятся процессы смешивания, транспортировки, классификации сыпучих материалов, теплообмена, сушки, например, зерна, адсорбции и т.п. Это объясняется следующими его достоинствами:

- происходит интенсивное перемешивание твердой фазы, которое приводит к выравниванию температур и концентраций в рабочем объеме аппарата, что исключает локальный перегрев твердых частиц, препятствующий оптимальному проведению процесса и влияющий на качество продукции;

- текучесть псевдоожигенного слоя позволяет создавать аппараты непрерывного действия с непрерывным вводом и отводом отработанной твердой фазы;

- происходит резкое увеличение площади поверхности тепло и массопередачи и снижение диффузионных сопротивлений в псевдоожигенном слое за счет использования частиц малого диаметра с большой удельной поверхностью, что позволяет увеличить производительность аппаратов при проведении ряда



Процессы и аппараты пищевых производств

сорбционных, тепловых и других процессов;

- коэффициенты теплоотдачи и эффективная теплопроводность от псевдооживленного слоя к поверхностям нагрева достаточно высоки, что позволяет значительно интенсифицировать теплообменные процессы и, как следствие, уменьшить рабочие объемы теплообменных аппаратов;

- в аппаратах с псевдооживленным слоем гидравлическое сопротивление невелико и не зависит от скорости оживающего агента в пределах существования псевдооживленного слоя;

- диапазон свойств твердых частиц оживающих агентов (газ, пары, капельные жидкости, вибрация) достаточно широк и включает в том числе пастообразные материалы и суспензии;

- аппараты для проведения процесса довольно просты, легко механизуются и автоматизируются.

Наряду с достоинствами методу проведения процессов в псевдооживленном слое присущи и недостатки:

- частицы в псевдооживленном слое интенсивно истираются;

- пыль, образующаяся при истирании частиц, уносится, и рабочая скорость оживающего агента ограничивается скоростью уноса твердых частиц из слоя. Это вызывает необходимость устанавливать пылеулавливающие устройства;

- при псевдооживлении частиц диэлектрических материалов возможно возникновение зарядов статического электричества, что приводит к взрывоопасности установки.

Указанные недостатки метода псевдооживления не являются определяющими и могут быть частично или полностью устранены.

9.2. Физические основы псевдооживления и расчетные формулы

Рассмотрим образование псевдооживленного слоя. В вертикальном аппарате (рис.9.2.1), снабженном поперечной перфорированной газораспределительной решеткой, помещен слой тонкодисперсного твердого материала. Оживающий агент - газ подается в нижнюю часть аппарата под решетку. Перепад давления замеряется дифференциальным манометром.



Процессы и аппараты пищевых производств

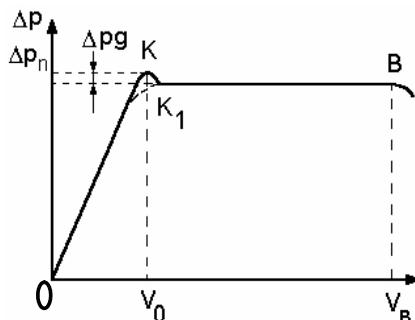


Рисунок 9.2.1 - Кривая псевдооживления

Состояние двухфазной системы наглядно изображается в виде кривой псевдооживления (рис.9.2.1). Эта кривая выражает зависимость перепада давления в слое Δp от скорости оживающего агента v :

$$\Delta p/H_0 = f(v), \quad (9.2.1)$$

где H_0 - высота неподвижного слоя, м.

При невысоких скоростях газа слой зернистого материала на решетке остается неподвижным, происходит фильтрация газа через слой (кривая ОК). С увеличением скорости газа перепад давления в слое возрастает, и в определенный момент масса зернистого материала в слое уравнивается гидродинамическим давлением потока газа, наступает гидродинамическое равновесие. В условиях гидродинамического равновесия начинается взаимное пульсационное перемещение частиц. Излом в точке K_1 определяет скорость газа, при которой начинается псевдооживление, ордината - перепад давления в этой точке. Скорость газа (жидкости) v_0 , при которой слой зернистого материала переходит в псевдооживленное состояние, называется *скоростью начала псевдооживления*. При дальнейшем увеличении скорости газа слой расширяется, интенсивность перемешивания частиц возрастает, но перепад давления остается постоянным.

При определенной, так называемой второй критической скорости v_B , или *скорости уноса*, гидродинамическое равновесие нарушается. Эта скорость является верхним пределом существования псевдооживленного слоя. При $v > v_B$ частицы уносятся из слоя, в результате этого снижается их массовое количество, и уменьшается энергия, необходимая для поддержания твердой фазы во взвешенном состоянии.

Реальная кривая псевдооживления несколько отличается



Процессы и аппараты пищевых производств

от идеальной. Для реальной кривой характерно наличие пика давления Δp_n в момент перехода в псевдооживленное состояние, который объясняется затратой дополнительной энергии на преодоление сил сцепления между частицами. Величина пика давления зависит от формы и состояния поверхности частиц.

Реальная кривая псевдооживления обнаруживает гистерезис - так называемые линии прямого и обратного хода, которые получают соответственно при постепенном увеличении и уменьшении скорости газа. Эти линии вблизи точки К не совпадают, причем на линии обратного хода пик давления отсутствует и она, как правило, располагается ниже линии прямого хода. Вправо от точки К эти линии совпадают. В реальных условиях перепад давления может не быть строго постоянным. Он может монотонно возрастать, а также колебаться около некоторого среднего значения. Форма кривой псевдооживления отражает состояние слоя.

Пределы существования псевдооживленного слоя таким образом ограничены скоростью начала псевдооживления и скоростью уноса. Резкий переход от неподвижного слоя к псевдооживленному характерен для слоев, состоящих из частиц близкого размера. Для полидисперсных слоев существует область скоростей псевдооживления, в которой начинается псевдооживление полидисперсных частиц и завершается переход от неподвижного к псевдооживленному слою.

Отношение рабочей скорости к скорости начала псевдооживления называется *числом псевдооживления*. Число псевдооживления характеризует состояние псевдооживленного слоя и интенсивность перемешивания частиц в слое. Характеристики псевдооживленного слоя зависят от числа псевдооживления.

Псевдооживление слоя может быть однородным и неоднородным. Однородное псевдооживление имеет место при псевдооживлении слоя капельной жидкостью. Для неоднородного псевдооживленного слоя характерно наличие в слое газовых пузырей (рис.9.2.2). При небольших числах псевдооживления неоднородность слоя не сказывается отрицательно на его характеристиках.

Процессы и аппараты пищевых производств

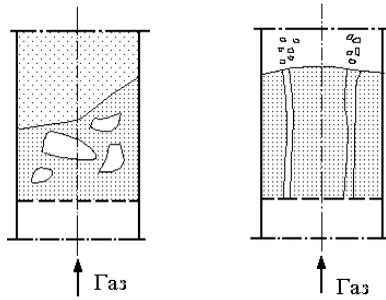


Рисунок 9.2.2 - Структура неоднородного псевдооживленного слоя

Движущиеся газовые пузыри интенсифицируют перемешивание частиц в слое. Однако при увеличении числа псевдооживления неоднородность слоя возрастает: увеличивается размер пузырей, и начинается интенсивный выброс (унос) частиц из слоя. Поперечный размер пузырей достигает размера аппарата. Возникает так называемый поршневой режим, при котором ухудшается равномерность контакта между газом и частицами материала.

При газовом псевдооживлении, особенно влажных, мелких и слипающихся частиц может также наблюдаться каналообразование, при котором часть газа «проскакивает» через слой (рис.9.2.2). Предельным случаем каналообразования является образование фонтанирующего слоя. При фонтанировании поток газа (или жидкости) прорывается через слой по каналу, возникающему близ оси аппарата.

Различают псевдооживление в плотной и разбавленной фазах.

Псевдооживление в плотной фазе наблюдается, когда скорость газа находится в пределах между скоростью начала псевдооживления и скоростью уноса. Если скорость газа выше скорости уноса, происходит пневмотранспорт частиц из слоя. В этом случае псевдооживленный слой находится в разбавленной фазе. В пределах разбавленная фаза существует, когда хотя бы одна частица находится в газовом потоке.

Для создания и поддержания в псевдооживленном состоянии слоя твердых частиц требуются затраты энергии E , которая расходуется на преодоление трения частиц друг о друга и газа об их поверхность, на расширение слоя, на трение частиц и газа о стенки аппарата.



Процессы и аппараты пищевых производств

Для аппаратов постоянного сечения, пренебрегая сжимаемостью газа

$$E = v \Delta p F,$$

где Δp - перепад давления при движении газа через слой;
 F - площадь поперечного сечения аппарата.

Перепад давления в слое, необходимый для выбора дутьевого оборудования, определяется теоретическим путем. Если принять порозность ε постоянной по высоте слоя H , то

$$\Delta p = \rho \varepsilon (1 - \varepsilon) H, \quad (9.2.2)$$

где $\rho \varepsilon$ - эффективная плотность частиц, кг/м³; ε - порозность псевдооживленного слоя.

Порозность

$$\varepsilon = 1 - \rho_{сл} / \rho_t,$$

где $\rho_{сл}$ - плотность слоя; ρ_t - плотность твердых частиц.

Порозность неподвижного слоя

$$\varepsilon_0 = 1 - \rho_n / \rho_t,$$

где ρ_n - насыпная плотность материала, кг/м³.

В точке начала псевдооживления согласно уравнению (9.2.2):

$$\Delta p / H_0 = \rho \varepsilon (1 - \varepsilon_0)$$

Приравнивая выражения (9.2.1) и (9.2.2), получают уравнение для определения скорости псевдооживления:

$$f(v_0) = \rho \varepsilon (1 - \varepsilon_0)$$

В литературе предложен ряд зависимостей для расчета скорости начала псевдооживления, полученных на основе различных уравнений для расчета гидравлического сопротивления слоя.

О.М.Тодес получил критериальную зависимость для расчета скорости начала псевдооживления, справедливую при $\varepsilon_0 = 0,38..0,42$.

$$Re_0 = \frac{Ar}{1400 + 5,22 \sqrt{Ar}} \quad (9.2.3)$$

где Re_0 - критерий Рейнольдса; Ar - критерий Архимеда.

Зависимость (9.2.3) используется практически на всем диапазоне чисел Рейнольдса при ламинарном, переходном и турбулентном режимах.

При расчете скорости псевдооживления по уравнению (9.2.3) вычисляют сначала значения критерия Ar

$$Ar = g \frac{l^3}{v^2} \frac{\rho_m - \rho_{жс}}{\rho_{жс}},$$



Процессы и аппараты пищевых производств

затем находят величину Re_0 и по ней, используя уравнение

$$v_0 = \frac{Re \mu_{жс}}{l \rho_{жс}},$$

вычисляют скорость начала псевдооживления.

Для частиц несферической формы скорость начала псевдооживления определяют с учетом фактора формы Φ .

Размер частиц d_i , форма которых отличается от сферической, определяют, как диаметр шара по объему равновеликого частице:

$$d_i = \sqrt[3]{\frac{6V_y}{\pi}},$$

где V_y - среднearифметическое значение объема одной частицы в данной фракции.

Фактор формы частиц определяется как отношение площадей поверхностей равновеликого шара и частицы S_y :

$$\Phi = \sqrt{\frac{4,87V_y^{2/3}}{S_y}}$$

Расчет второй критической скорости v_B (скорости уноса), при которой происходит массовый унос частиц, проводят по формуле, аналогичной (9.2.3):

$$Re_\epsilon = \frac{Ar}{18 + 0,575\sqrt{Ar}}$$

Скорость витания (уноса)

$$v_\epsilon = \frac{Re_\epsilon \nu}{d},$$

где ν - коэффициент кинематической вязкости.

9.3. Аппараты с псевдооживленным слоем

Разработаны многочисленные конструкции аппаратов с псевдооживленным слоем, учитывающие технологические условия протекания процессов, требования к качеству получаемых продуктов, специфические особенности взаимодействующих веществ. На рис.9.3.1 показаны некоторые схемы аппаратов с псевдоожив-



Процессы и аппараты пищевых производств

женным слоем.

По принципу действия аппараты бывают периодического и непрерывного действия. В аппаратах непрерывного действия происходит взаимодействие газового потока с зернистым материалом, который непрерывно вводится в аппарат и выводится из него. Процесс может осуществляться в противотоке, прямотоке и перекрестном токе.

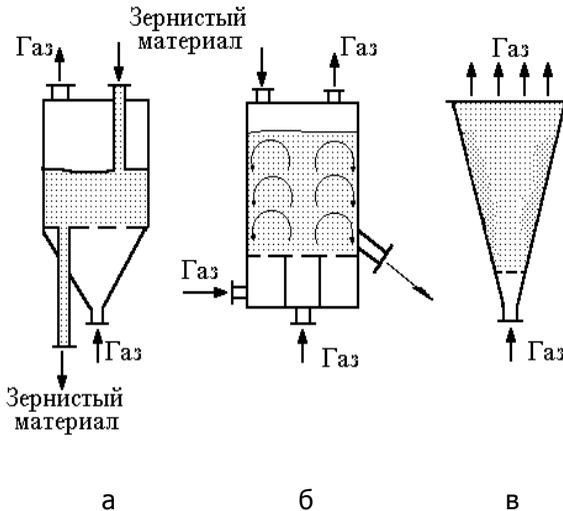


Рисунок 9.3.1 - Схемы аппаратов для псевдоожижения

В *цилиндрический противоточный аппарат непрерывного действия* (рис.9.3.1, а), *ожижающий газовый поток* поступает снизу под газораспределительную решетку, а *зернистый материал* - в верхнюю часть аппарата. Для поддержания определенного уровня материала на газораспределительной решетке и вывода его из аппарата служит *переточный патрубок*.

Вертикальные цилиндрические силосы используются для накопления и усреднения больших партий зерна. Псевдоожиженный слой создается газом (воздухом), поступающим во внутреннюю полость между двумя днищами, которая разделена концентрической перегородкой на внешнее и внутреннее кольца (рис.9.3.1, б). Во внешнее кольцо подается примерно в два раза больше газа, чем во внутреннее кольцо; в силосе создается направленная циркуляция зернового материала от периферии к оси аппарата, способствующая его перемешиванию.

В *конических аппаратах* уменьшение скорости снизу вверх позволяет псевдоожижать полидисперсные материалы. Газ пода-



Процессы и аппараты пищевых производств

ется через небольшое отверстие внизу аппарата с большой скоростью (рис.9.3.1, в). Это позволяет при необходимости работать без газораспределительной решетки, что особенно важно при псевдоожигении комкающихся и слипающихся материалов. При значительном угле конусности аппарата струя газа может оторваться от стенок аппарата и образовать сплошной канал. По этому каналу будет двигаться с большой скоростью поток газа, образующий над поверхностью слоя фонтаны твердых частиц. Такой слой называется фонтанирующим.

В аппаратах с фонтанирующим слоем возникает интенсивная циркуляция зернистого материала от оси к стенкам.

Установка для пневмотранспортирования зернистого материала в разбавленной псевдоожигенной фазе показана на рис.9.3.2.

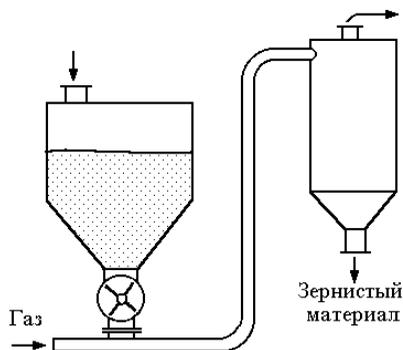


Рисунок 9.3.2 - Установка для пневмотранспортирования

Зернистый материал дозируется в пневмолинию с помощью шлюзового затвора. Разделение псевдоожигенного слоя на зернистый материал и газ происходит на новом уровне в циклоне.

При псевдоожигении мелких частиц диаметром 25...40 мкм, обладающих склонностью к агломерации, слипанию и электризации, для улучшения перемешивания и разрушения застойных зон, а также для интенсификации процессов тепло и массообмена используют газомеханический способ псевдоожигения. При этом способе дополнительную энергию вводят в слой посредством различного рода перемешивающих устройств и вибраторов.

Для снижения обратного перемешивания зернистого материала, которое приводит к снижению производительности, в противоточных аппаратах непрерывного действия применяют *секционирование* (рис.9.3.3), т.е. разделяют весь слой зернистого



Процессы и аппараты пищевых производств

материала по высоте перфорированными перегородками (решетками).

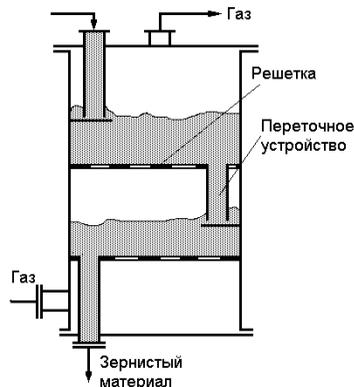


Рисунок 9.3.3 - Секционирование при псевдооживлении в горизонтальных перегородках

Перетекание зернистого материала из верхних секций в нижние происходит под действием гравитации через специальные переточные устройства.

Контрольные вопросы и задания:

- 1) Какое состояние зернистого материала называется псевдооживленным?
- 2) Какими достоинствами и недостатками обладает псевдооживленный слой?
- 3) Какие явления характерны для слоя зернистого материала при скорости газа, равной скорости начала псевдооживления, скорости уноса?
- 4) Чем реальные кривые псевдооживления отличаются от идеальной кривой?
- 5) Какие существуют конструкции аппаратов с псевдооживленным слоем?



ЛЕКЦИЯ №10

ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ.

СМЕШИВАНИЕ

10.1 Смешивание. Общие сведения

Смешивание применяется для получения суспензий, эмульсий. При смешивании пластичных и сыпучих материалов ставится задача получения однородной массы основного вещества с различными твердыми, жидкими и пластичными добавками. При смешивании интенсифицируются тепловые, диффузионные и биохимические процессы. Для смешивания используются смесители различных конструкций.

Критерии качества смеси. В идеализированном процессе смешивания твердых материалов, находящихся в зернистом или порошкообразном состоянии должны получать такую смесь, когда в любой ее точке к каждой частице одного из компонентов примыкают частицы других компонентов в количествах, определяемых заданным соотношением компонентов.

Однако такое идеализированное расположение частиц в действительности не наблюдается, так как слишком велико число факторов, которые влияют на взаимные перемещения и от которых в конечном результате зависит качество смеси. Эти факторы можно разделить на три группы:

- методы смешивания (распыление, пересыпание, перелопачивание, наслаивание компонентов, смешение компонентов в "кипящем" слое и т.д.);

- конструктивные особенности смесителей и их режимы работы (степень заполнения, скорость и характер циркуляции материала внутри смесителя, конструкция размешивающего органа, скорость вращения этого органа и т.д.);

- физико-механические характеристики смеси компонентов (соотношение компонентов, их гранулометрический состав, объемные массы, коэффициент внутреннего трения и т.п.).

Соотношение компонентов в произвольной точке смеси - величина случайная. Поэтому большинство современных методов оценки качества смеси основаны на методах статистического анализа.

Для оценки качества смешивания смесь условно считают двухкомпонентной. Для этого выделяют из смеси один какой-то элемент, называемый ключевым, а все остальные объединяют во второй условный компонент. По степени распределения ключево-



Процессы и аппараты пищевых производств

го компонента в массе второго условного компонента и судят о качестве смеси. Таким образом, в двухкомпонентной смеси случайной величиной X является содержание ключевого компонента в ее микрообъемах.

Случайная дискретная величина X может быть полностью описана, если известны: закон ее распределения, математическое ожидание M , дисперсия D или среднее квадратическое отклонение S .

Большинство исследователей в качестве основы критерия оценки качества смеси принимают среднее квадратическое отклонение содержания ключевого компонента в пробах, взятых из смеси. Величину среднего квадратического отклонения подсчитывают по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m)^2}{n-1}} \quad (10.1.1)$$

где x_i - значение случайной величины X в i -ом опыте (в нашем случае - содержание ключевого элемента); m - среднее арифметическое наблюдаемых значений величины X (в нашем случае - среднее арифметическое содержание ключевого компонента во всех пробах); n - общее число отобранных проб.

В России наибольшее распространение в качестве критерия оценки качества смеси получил коэффициент неоднородности (вариации) V_c , у которого $S = \bar{m}$:

$$V_c = \frac{S \cdot 100}{\bar{m}} = \frac{100}{\bar{m}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{m})^2}{n-1}} \quad (10.1.2)$$

Обычно при анализах смеси определяют не число частиц ключевого компонента в пробах, а его концентрацию c в них, что практически значительно проще. С учетом этого формулы (10.1.1) и (10.1.2) записываются в виде:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})^2};$$

$$V_c = \frac{100 \cdot S}{\bar{c}} = \frac{100}{\bar{c}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})^2}$$



Процессы и аппараты пищевых производств

где \bar{c} - среднее арифметическое значение концентрации ключевого компонента в пробах в %; c_i - значение концентрации ключевого компонента в i -ой пробе; n - число проанализированных проб.

Коэффициент неоднородности (вариации) V_c зависит от веса проб, отбираемых на анализ.

Действительно, из статистики известно, что доверительный уровень оценки среднего квадратического отклонения в генеральной совокупности S_r , по S - среднему квадратическому отклонению наблюдаемой величины по экспериментальным ее измерениям определяется неравенством:

$$t_1 S < S_r < t_2 S$$

Для реальной смеси можно записать

$$S^2 = S_c^2 - S_r^2$$

где S^2 - дисперсия концентрации ключевого компонента, вызванного не идеальностью смеси; S_c^2 - действительная дисперсия концентрации ключевого компонента, измеренная по большому числу анализов проб из смеси; S_r^2 - дисперсия концентрации ключевого компонента в пробах при идеальном смешивании.

Величина S_r для одной и той же смеси зависит от числа смещиваемых компонентов в пробе, т.е. от веса G .

Моделирование процесса смешения. Для разнообразных потоков материала, которые могут возникнуть в реальных аппаратах, можно подобрать подходящую математическую модель из типовых моделей. Наибольшее распространение получили следующие типовые модели структуры потока материала:

- модели идеального вытеснения и идеального смешения;
- диффузионная модель;
- ячеечная модель;
- комбинированные модели.

Модель идеального вытеснения предполагает поршневое перемещение материала вдоль аппарата без перемешивания частиц в направлении этого перемещения. В направлении же, перпендикулярном к движению, компоненты материала считаются распределенными равномерно.

Уравнение этой модели записывается в следующем виде:

$$\frac{dc}{dt} = -W \frac{dc}{dx} \quad (10.1.3)$$

где c - концентрация ключевого компонента; t - время; W - линейная скорость потока; x - координата.



Процессы и аппараты пищевых производств

Эта модель не предполагает перемешивания частиц, единственно за счет которого могла бы изменяться во времени концентрация ключевого элемента в смесительном аппарате. Следовательно, для описания процесса смешения компонентов, инертных друг к другу, модель не подходит

$$\frac{dc}{dx} = 0; \quad \frac{dc}{dt} = 0$$

Модель идеального смешения принимается для тех потоков, при которых в аппарате частицы материала практически мгновенно равномерно распределяются по всему его объему. Она описывается уравнением:

$$\frac{dc}{dt} = \frac{Q}{V}(c_{ex} - c_{вых}), \quad (10.1.4)$$

где V - внутренний объем аппарата; Q - объемная скорость подачи материала в аппарат; $c_{вх}$ и $c_{вых}$ - концентрация ключевого компонента во входящем потоке и на выходе из аппарата.

Аппарат, в котором существует поток материала, определяемый моделью идеального смешения, является идеальным смесителем: в нем величина коэффициента неоднородности смеси равна нулю, точно так же, как равно нулю и время смешения. Модель идеального смешения в чистом виде мало соответствует действительному процессу смешивания частиц материала, который наблюдается в аппаратах для смешения сыпучих материалов.

Диффузионная модель соответствует потоку с поршневым движением материала, осложненным продольным или поперечным, а иногда и тем и другим одновременно смешиванием частиц, подчиняющимся закону диффузии. Если наблюдается только продольное смешивание частиц, то диффузионная модель, называемая в этом случае однопараметрической, описывается уравнением:

$$\frac{dc}{dt} = -W \frac{dc}{dx} + \overline{D}_L \frac{d^2c}{dx^2}, \quad (10.1.5)$$

где \overline{D}_L - коэффициент продольного смешивания.

При наличии одновременно продольного и поперечного смешивания частиц диффузионная модель, называемая двухпараметрической, описывается другим уравнением:



Процессы и аппараты пищевых производств

$$\frac{dc}{dt} = -W \frac{dc}{dx} + \overline{D}_L \frac{d^2c}{dx^2} + \frac{\overline{D}_R}{R} \frac{d}{dR} \left(R \frac{dc}{dR} \right), \quad (10.1.6)$$

где \overline{D}_R - коэффициент поперечного смешивания; R - радиус поперечного сечения аппарата.

При экспериментальном определении коэффициентов смешивания их представляют в виде безразмерных комплексов Пекле:

$$Pe = WL/D_L \quad \text{или} \quad Pe = WL/D_R,$$

где L - определяющий линейный размер аппарата; W - линейная скорость потока материала по аппарату.

Если $Pe = \infty$, то диффузионная модель переходит в модель идеального вытеснения, а если $Pe = 0$, то в модель идеального смешивания.

Диффузионной моделью можно описать процесс смешивания в большинстве смесителей. Однако для решения уравнения этой модели необходимо знание коэффициентов \overline{D}_L и \overline{D}_R . Обычно они находятся экспериментально для каждого смесителя, что значительно снижает ценность этой модели.

Ячеечная модель предполагает, что поток материала проходит через несколько ячеек, на которые разбит весь объем аппарата, и что в пределах каждой ячейки частицы материала идеально смешиваются. Она описывается *m*-ым числом дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\frac{1}{m} \frac{dc}{dt} = \tau_n (c_{i-1} - c_i)$$

где $i = 1, 2, \dots, m$; m - число ячеек; τ_n - среднее время пребывания частиц в ячейках от первой до $(i-1)$ -ой.

Связь между числом ячеек m , на которые разбит весь аппарат, и дисперсией функции времени пребывания приближенно

может быть выражена уравнением:

$$S^2 = \frac{1}{m} = 2 \frac{\overline{D}_L}{WL}$$

При $m = 1$ ячейчная модель переходит в модель идеального смешения, а при $m = \infty$ - в модель идеального вытеснения.

Ячеечная модель может быть успешно использована для описания процесса смешивания сыпучих материалов в смесителях периодического действия с явно выраженной внутренней циркуляцией материала по замкнутому контуру.



Комбинированные модели обычно составляют для аппаратов, имеющих байпасные и циркуляционные потоки, застойные зоны. При этом аппарат разбивают на отдельные зоны, соединенные потоком материала последовательно или параллельно, в которых наблюдаются различные структуры движения частиц: зона с потоком идеального смешения, с потоком идеального вытеснения и зона с диффузионным смешиванием частиц. Уравнение комбинированной модели является комбинацией из уравнений для моделей отдельных зон, составленной с учетом последовательности и способа соединения зон потоком материала. При большом числе зон практически любой сложный процесс может быть описан комбинированной моделью, однако из-за громоздкости получающихся при этом уравнений сам процесс моделирования значительно усложняется.

Механизм процесса периодического смешения. Рассмотрим теоретическое описание процесса смешения на примере смешения сыпучих зернистых материалов.

Процесс смешения сыпучих материалов является сложным механическим процессом, механизм действия которого зависит главным образом от конструкции смесителя. Складывается он из следующих элементарных процессов:

перемещение группы смежных частиц из одного места смеси в другое внедрением, вмятием, скольжением слоев (процесс конвективного смешения);

постепенное перераспределение частиц различных компонентов через свежееобразованную границу их раздела (процесс диффузионного смешения);

сосредоточение частиц, имеющих одинаковую массу, в соответствующих местах смесителя под действием гравитационных или инерционных сил (процесс сегрегации).

Процесс сегрегации по своему действию на смесь противоположен первым двум процессам: он ухудшает качество смеси.

При смешивании сыпучих материалов в смесителе одновременно протекают все три элементарных процесса. Однако доля их влияния в различные периоды смешения неодинакова.

В первые мгновения работы смесителя качество смеси изменяется в основном за счет конвективного разноса компонентов. Поверхность раздела между различными компонентами невелика и поэтому диффузионный процесс оказывает незначительное влияние. Незаметно влияние сегрегации.

Процесс конвективного смешения в первые моменты идет с большой скоростью (участок I кривой на рис. 10.1.1). Скорость



Процессы и аппараты пищевых производств

процесса при этом не зависит от физико-механических свойств смеси, так как процесс смешения идет на уровне макрообъемов. Главное влияние на скорость процесса смешения оказывает характер движения потоков частиц в смесителе.

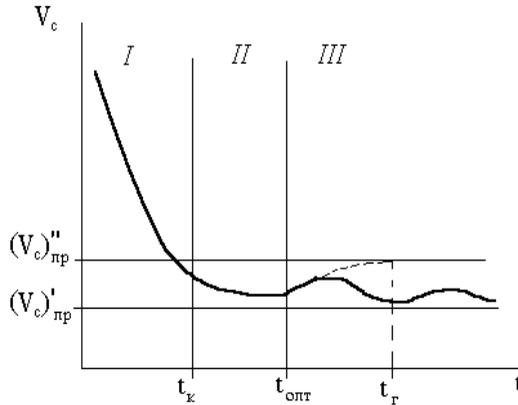


Рисунок 10.1.1 - Зависимость коэффициента неоднородности смеси от времени смешивания

После того, как компоненты будут распределены по рабочему объему смесителя, процессы конвективного и диффузионного смешения становятся по их влиянию на общий процесс смешения сопоставимы. В это время процесс смешения идет на уровне микрообъемов. Начиная с некоторого момента, процесс диффузионного смешения становится преобладающим (II участок кривой). Более заметное влияние оказывает процесс сегрегации частиц.

Два противоположных процесса: сегрегации и диффузионный могут в определенный момент уравновесить друг друга. После этого момента дальнейшее смешивание не имеет смысла, так как качество смеси остается неизменным (III участок кривой).

Скорость перераспределения частиц (II и III участки) зависит не только от характера движения потока материала в смесителе, но и от физико-механических свойств частиц.

Для некоторых типов смесителей при смешивании зернистых материалов, состоящих из однотипных частиц, II участок может отсутствовать, т.е. предельное состояние смеси достигается только конвективным смешением.



10.2 Смесители для сыпучих материалов

Для смешивания сыпучих материалов в пищевых производствах используют как смесители, работающие в других отраслях промышленности, так и специально сконструированные 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 непрерывного действия и периодического действия. Смесители периодического действия можно разделить на барабанные, ленточные, бегунковые, центробежные, с вращающимся ротором, червячно-лопастные, плунжерные, пневмосмесители и смесители с псевдооживленным слоем; смесители непрерывного действия - на барабанные, червячно-лопастные, роторные и др. Скоростной циркуляционный смеситель фирмы Гюнтхер Папенмайер и Ангер (Германия) с псевдооживлением сыпучего материала с вращающимся ротором, выполненным в виде пропеллерной мешалки, показан на рис. 10.2.1.

В коническом корпусе этого смесителя, зауженном в верхней части, размещен смесительный ротор, жестко закрепленный на конце консольного вала, приводимого во вращение от двухскоростного двигателя через клиноременную передачу. Смесительный ротор представляет собой две пропеллерные мешалки, смонтированные одна над другой. Верхняя мешалка устанавливается у вершины образующейся воронки сыпучего материала, а нижняя мешалка повторяет форму днища и имеет диаметр лопастей приблизительно равный диаметру широкой части корпуса. Сквозь крышку корпуса пропущен стержень с направляющей лопаткой.

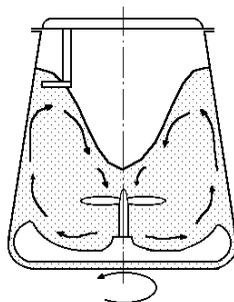


Рисунок 10.2.1 - Принципиальная схема лопастного смесителя

Смеситель работает следующим образом. При вращении вала смешиваемые компоненты, засыпанные в корпус смесителя, засасываются верхней мешалкой и проталкиваются на нижнюю мешалку. Нижняя мешалка сообщает массе материала вращательное движение, благодаря которому на частицы начинают действовать центробежные силы и силы кориолисова ускорения. Под действием этих сил частицы материала от центра смесителя перемещаются по спиральным траекториям сначала к стенкам корпуса, а затем по ним вверх. В верхнем слое частицы движутся к оси вращения мешалок. Назначение направляющей лопатки - способствовать более быстрому продвижению материала от стенок корпуса к верхней мешалке. Верхняя мешалка лишь ускоряет продвижение материала к рабочему органу псевдооживления - нижней мешалке.

При многократном соударении частиц между собой, о стенки корпуса и лопасти мешалок возникает значительный тепловой эффект. Однако вследствие краткости процесса смешения в таких смесителях материал не успевает разогреться до опасных температур. Для охлаждения или подогрева материала в смесители охлаждающий или подогревающий агент подается в полости и рубашку смесителя.

10.3 Смешивание жидких сред, пластических масс

Для смешивания жидких сред используется несколько способов: пневматический, циркуляционный, статический и механический с помощью мешалок.

Пневматическое смешивание осуществляется с помощью сжатого газа (в большинстве случаев воздуха), пропускаемого



Процессы и аппараты пищевых производств

го через слой смешиваемой жидкости. Для равномерного распределения газа в слое жидкости газ подается в смеситель через барботер. Барботер представляет собой ряд перфорированных труб, расположенных у дна смесителя по окружности или спирали. В ряде случаев смешивание осуществляется с помощью эжекторов. Интенсивность смешивания определяется количеством газа, пропускаемого в единицу времени через единицу свободной поверхности жидкости в смесителе.

Пневматическое смешивание имеет ограниченное применение. Оно используется тогда, когда допускается взаимодействие смешиваемой жидкости с газом.

Циркуляционное смешивание осуществляется с помощью насоса, перекачивающего жидкость по замкнутой системе смеситель-насос-смеситель. Интенсивность циркуляционного смешивания зависит от кратности циркуляции, т.е. отношения подачи циркуляционного насоса в единицу времени к объему жидкости в аппарате. В ряде случаев вместо насосов могут применяться паровые инжекторы.

Статическое смешивание жидкостей невысокой вязкости, а также газа с жидкостью осуществляется в статических смесителях за счет кинетической энергии или газов. Статические смесители устанавливаются в трубопроводах перед реактором или другой аппаратурой или непосредственно в реакционном аппарате. Простейшими статическими смесителями являются устройства с винтовыми вставками различной конструкции.



Рисунок 10.3.1 - Статический смеситель

На рис.10.3.1 представлена конструкция цилиндрического статического смесителя, предназначенного для смешивания газа и жидкости, с вставными элементами, представляющими собой разно закрученные пластины из нержавеющей стали, установленные без зазоров в корпусе смесителя. Количество установленных элементов зависит от вязкости, а также от соотношения вязкостей смешиваемых жидкостей: чем выше вязкость и различие в вязкостях смешиваемых жидкостей, тем больше устанавливается эле-



ментов.

Статические смесители используются для получения эмульсий. На рис.10.3.2 изображен вихревой эмульсор для получения эмульсий жирофосфатидной смеси в обезжиренном молоке (замениватель цельного молока). Вихревой эмульсор обеспечивает высокую эффективность эмульгирования при давлении 0.3...0.36 МПа, прост в изготовлении и эксплуатации. Принцип его действия заключается в использовании эффекта центробежной форсунки при каскадном истечении жидкости. Получаемая эмульсия с размером частиц до 3 мкм не расслаивается в течение 24ч.

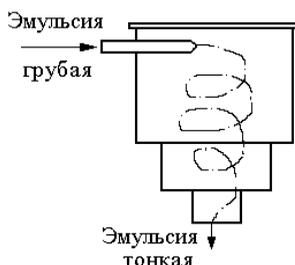


Рисунок 10.3.2 - Вихревой эмульсатор

Механическое смешивание используется для интенсификации гидромеханических процессов (диспергирования), тепло- и массообменных, биохимических процессов в системах жидкость-жидкость, газ-жидкость и газ-жидкость-твердое тело. Осуществляется оно при помощи различных смешивающих устройств - мешалок. Мешалка представляет собой комбинацию лопастей, посаженных на вращающийся вал.

По конструкции мешалки можно разделить на лопастные, турбинные и пропеллерные; специальные - винтовые, шнековые, ленточные, рамные, ножевые и другие, служащие для смешивания пластичных и сыпучих масс (рис.10.3.3). По частоте вращения рабочего органа на тихоходные и быстроходные.

Лопастные, ленточные, якорные и шнековые мешалки относятся к тихоходным: частота вращения 30...90 об/мин, окружная скорость на конце лопасти для вязких жидкостей 2...3 м/с. Достоинством лопастных мешалок является простота, доступность и невысокая стоимость.

Якорные мешалки имеют форму днища аппарата и применяются для смешивания вязких жидкостей. При смешивании они очищают днище от налипающих загрязнений.

Шнековые мешалки имеют форму винта и приме-



Процессы и аппараты пищевых производств

няются для вязких сред.

К быстроходным относятся пропеллерные и турбинные мешалки: частота их вращения от 100 до 3000 об/мин при окружной скорости до 3...20 м/с.

Пропеллерные мешалки изготавливают с двумя или тремя пропеллерами. Они обладают насосным эффектом и используются для создания интенсивной циркуляции жидкости. Применяются для смешивания жидкостей вязкостью до 2 Па·с.

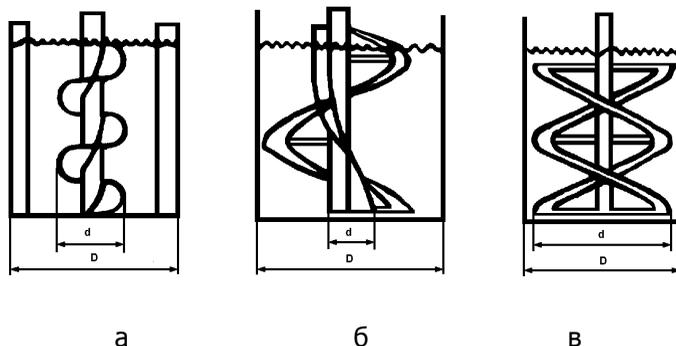


Рисунок 10.3.3 - Схемы шнековых (а) и ленточных (б, в) мешалок

Турбинные мешалки изготавливаются в форме колес турбин с плоскими, наклонными и криволинейными лопастями. Они бывают открытого и закрытого типа. Закрытые мешалки имеют два диска с отверстиями в центре для прохода жидкости. Для одновременного создания радиального и осевого потоков применяют турбинные мешалки с наклонными лопастями. Турбинные мешалки применяют для смешивания жидкостей вязкостью до 500 Па·с, а также грубых суспензий.

Расчет смешивающих устройств сводится к определению мощности, расходуемой на смешивание. Интенсивность смешивания назначается на основании технических требований (и находятся экспериментально).

После выбора типа, размеров и частоты вращения мешалки приступают к расчету потребляемой мощности.

Приняв циркуляцию жидкости в смесителе по замкнутому трубопроводу сложной формы, можно получить критериальное уравнение для расчета потребляемой мощности:

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

Влиянием сил тяжести на движение жидкости можно пренебречь, а в качестве определяющего размера принимается диа-



Процессы и аппараты пищевых производств

метр мешалки. Вместо линейной скорости жидкости, среднюю величину которой практически невозможно определить в критерии подобия, подставляется окружная скорость конца лопасти мешалки:

$$\omega = \frac{\pi d n}{60}$$

Конкретное уравнение для каждого типа мешалки определяется экспериментальным путем и, в общем случае, может быть представлено в виде:

$$Eu_m = Re_m^n \Gamma_1^a \Gamma_2^b; \quad Eu_m = \frac{n}{\rho n^3 d_m^5}; \quad Re_m = \frac{n d_m^2 \rho}{\mu_{ж}}$$

где Γ_1, Γ_2 - параметрические критерии, характеризующие геометрические размеры мешалки и смесителя; Eu_m - критерий Эйлера модифицированный; Re_m - критерий Рейнольдса модифицированный; A, a, b - экспериментальные коэффициенты, которые можно найти в справочниках.

По рабочему объему аппарата V и требуемой интенсивности смешивания j [в $H^*/(мЗ. с)$] определяют потребляемую мощность:

$$N = j V_p$$

Затем выбирают тип мешалки, ее размеры и частоту вращения. По предварительно выбранным параметрам мешалки рассчитывают критерий Эйлера, в соответствии с которым находят Re_m . По значению Re_m определяют частоту вращения мешалки:

$$n = \frac{Re_m \mu_{ж}}{d_m^2 \rho}$$

Если найденная из этого соотношения частота вращения окажется больше или меньше предварительно принятой, то задаются другим ее значением, большим или меньшим. Расчет проводят до совпадения предварительно принятой частоты вращения мешалки с найденной из представленного соотношения.

Если полученную в результате такого расчета частоту вращения мешалки представляется целесообразным увеличить или уменьшить, для этого уменьшают или соответственно увеличивают предварительно принятый диаметр мешалки.



Процессы и аппараты пищевых производств

Мощность двигателя (в кВт) определяют из уравнения

$$N_{д} = \frac{m}{\eta},$$

где η - КПД привода.

Энергия, расходуемая на перемешивание мешалкой, определяется в зависимости от времени смешивания τ :

$$E = N_{д} \tau$$

В пусковой период, когда энергия расходуется не только на преодоление сил трения, но и на преодоление сил инерции приводимого в движение перемешивающего устройства и самой жидкости, потребляемая мощность возрастает по сравнению с расчетной.

Опыт показывает, что в период пуска сила, действующая на лопасти перемешивающего устройства со стороны жидкости, увеличивается в 2...4.5 раза по сравнению с усилиями, действующими в рабочий период.

При смешивании пластических масс, в частности при получении теста в хлебопекарном, макаронном и кондитерском производствах, не только смешиваются различные компоненты, но и тесто при этом разминается, насыщается воздухом и приобретает определенные свойства.

Процесс смешивания проводится в смесителях периодического или непрерывного действия, оборудованных смешивающими устройствами - рамными, шнековым и ленточными мешалками. Смесители могут иметь месильное устройство с горизонтальной или вертикальной осью.

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

Для расчета мощности, потребляемой шнековой мешалкой, может быть использовано уравнение:

$$Eu_m = \frac{71}{Re_m} \quad \text{или} \quad N = Ad_m n \mu$$



Процессы и аппараты пищевых производств

Коэффициент A определяется как функция типа геометрических соотношений смешивающего устройства.

Для смешивания мало- и высоковязких кондитерских масс (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 формы с расположенными в них двумя спиральными рабочими органами, вращающимися в разные стороны. Высокая интенсивность смешивания достигается за счет проведения процесса в тонком слое.

Тесто для пирожных готовится в аппарате с месильным устройством, которое имеет четыре лопасти, расположенные под углом 90° , выполненные в форме днища аппарата. Частота вращения мешалки 12 об/мин. По окончании процесса смешивания аппарат опрокидывается, при этом крышка откидывается и происходит выгрузка теста.

Контрольные вопросы и задания:

- 1) В чем заключается физический механизм смешивания ингредиентов смеси?
- 2) Какой показатель характеризует качество смешивания?
- 3) Какие известны математические модели структуры потока материала?
- 4) Какие существуют способы смешивания в жидких средах?
- 5) Какие конструкции мешалок применяют в пищевой технологии и от чего зависит выбор мешалки?
- 6) Какие типы месильных устройств применяют для смешивания пластичных масс, сыпучих материалов?



ЛЕКЦИЯ №11

ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ. ОБРАТНЫЙ ОСМОС И УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИЯ

11.1 Обратный осмос и ультрафильтрация. Общие сведения

Обратный осмос - это способ разделения растворов путем фильтрования под давлением через полупроницаемые мембраны, пропускающие растворитель и задерживающие молекулы или ионы растворенных веществ.

Ультрафильтрацией называется процесс разделения, фракционирования и концентрации растворов с помощью полупроницаемых мембран. При этом жидкость непрерывно подается в пространство над мембраной под давлением 0.1...10 МПа.

При ультрафильтрации исходный раствор разделяется на два принципиально новых продукта: низкомолекулярный (фильтрат) и высокомолекулярный. Фильтрат проходит сквозь мембрану и удаляется через дренажную систему, а высокомолекулярный продукт концентрируется. Ультрафильтрация позволяет выделять молочные белки из вторичных продуктов молочной промышленности и ценные вещества из других пищевых растворов, получать дополнительные резервы производства продуктов питания.

Применение мембранных процессов в пищевой технологии позволяет значительно снизить энергоемкость процесса обезвоживания фруктовых и овощных соков, сиропов, экстрактов по сравнению с процессами выпаривания или вымораживания, улучшить качество и повысить выход получаемых продуктов.

11.2 Теоретические основы разделения обратным осмосом и ультрафильтрацией

В основе метода разделения растворов обратным осмосом лежит явление самопроизвольного перехода растворителя через полупроницаемую мембрану в раствор (рис.11.2.1). Если давление над раствором ниже осмотического ($p < \pi$), то растворитель будет переходить в раствор до достижения осмотического равновесия в системе.

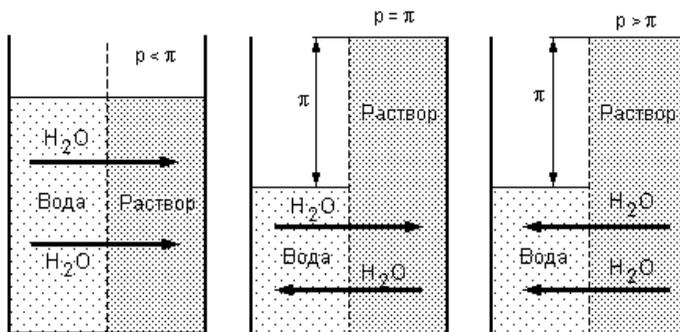


Рисунок 11.2.1 - Схема разделения раствора обратным осмосом

Равновесное состояние наступает, когда гидростатическое давление между раствором и растворителем, определяемое разностью уровней, станет равным осмотическому давлению ($p = \pi$).

Если после достижения осмотического равновесия со стороны раствора приложить давление, превышающее осмотическое ($p > \pi$), то растворитель начнет переходить из раствора в обратном направлении. В этом случае будет иметь место обратный осмос. Растворитель, прошедший через мембрану, называют фильтратом. Движущей силой процесса обратного осмоса является перепад давления $\Delta p = p - \pi_1$,

где p - избыточное давление под раствором; π_1 - осмотическое давление раствора.

Если в процессе обратного осмоса наблюдается некоторый переход через мембрану растворенного вещества, то при расчете движущей силы следует учитывать осмотическое давление фильтрата π_2 , прошедшего через мембрану. Тогда:

$$\Delta p = p - (\pi_1 - \pi_2) = p - \Delta \pi$$



Процессы и аппараты пищевых производств

Для приближенного расчета осмотического давления может быть использована формула Вант-Гоффа: $\pi = XRT$, где X - мольная доля растворимого вещества; R - газовая постоянная; T - абсолютная температура раствора, K .

Осмотическое давление растворов может достигать десятков мегапаскалей. Давление в обратноосмотических установках должно быть значительно больше осмотического, так как эффективность процесса определяется разностью между рабочим и осмотическим давлением. Так, например, при осмотическом давлении морской воды, содержащей 35% солей, равном 2.45 МПа, рабочее давление в опреснительных установках должно составлять около 7.85 МПа (80 атм).

Ультрафильтрацию применяют для разделения систем, в которых молекулярная масса растворенных компонентов значительно превышает молекулярную массу растворителя. Для разделения водных растворов ультрафильтрацию применяют, когда растворенные компоненты имеют молекулярную массу 500 и выше. Движущей силой ультрафильтрации является разность рабочего и атмосферного давлений. Обычно ультрафильтрацию проводят при невысоких давлениях, равных 0.1...1.0 МПа. Ультрафильтрация протекает под действием перепада давления до и после мембраны.

В зависимости от назначения процесса ультрафильтрации применяют мембраны, которые пропускают растворитель и преимущественно низкомолекулярные соединения (при разделении высоко и низкомолекулярных соединений), растворитель и определенные фракции высокомолекулярных соединений (при фракционировании высокомолекулярных соединений), только растворитель (при концентрировании высокомолекулярных соединений).

Разделение обратным осмосом и ультрафильтрацией происходит без фазовых превращений. Работа расходуется на создание давления в жидкости и продавливание ее через мембрану:

$$A_m = A_c + A_{пр}$$

где A_c - работа на сжатие жидкости; $A_{пр}$ - работа на продавливание жидкости через мембрану.

Так как жидкость несжимаема, величиной A обычно пренебрегают.

Работа на продавливание жидкости определяется по формуле:

$$A_{пр} = \Delta p V,$$

где Δp - перепад давления на мембране; V - объем продавливаемой жидкости.



Процессы и аппараты пищевых производств

Разделение методами обратного осмоса и ультрафильтрации принципиально отличается от обычного фильтрования. При обратном осмосе и ультрафильтрации образуются два раствора: концентрированный и разбавленный, в то время как при фильтровании осадок откладывается на фильтровальной перегородке. В процессе обратного осмоса и ультрафильтрации накопление растворенного вещества у поверхности мембраны (вследствие концентрационной поляризации) недопустимо, так как при этом резко снижаются селективность и проницаемость мембраны, сокращается срок ее службы. Селективность и проницаемость - это наиболее важные технологические свойства мембран.

Селективность в % процесса разделения на полупроницаемых мембранах определяется по формуле:

$$\varphi = \left(1 - \frac{x_2}{x_1} \right) \cdot 100,$$

где x_1 , x_2 - концентрация растворенного вещества соответственно в исходном растворе и фильтрате.

Проницаемость G [л/м² ч] при данном давлении выражается соотношением

$$G = V / (F\tau)$$

где V - объем фильтрата, л; F - рабочая площадь поверхности мембраны, м²; τ - продолжительность процесса.

Мембраны должны обладать следующими свойствами: высокой разделяющей способностью (селективностью); высокой удельной производительностью (проницаемостью); постоянством своих характеристик при эксплуатации; химической стойкостью в разделяющей среде; механической прочностью; невысокой стоимостью.

Для проведения процессов обратного осмоса и ультрафильтрации применяются пористые мембраны, изготавливаемые в основном из полимерных материалов. Полимерные мембраны могут быть анизотропными и изотропными.

Мембрана с анизотропной структурой состоит из тонкого поверхностного слоя на микропористой подложке. Разделение происходит на поверхностном активном слое, и практически весь перепад давления приходится на этот слой.

Изотропные мембраны образуются при облучении тонких полимерных пленок заряженными частицами с последующим химическим травлением. В последнее время выпускаются изотропные мембраны на основе поликарбонатных пленок.



Процессы и аппараты пищевых производств

Применяют следующие полимерные мембраны: целлюлозные, на основе эфиров целлюлозы, акрилонитриловые, нейлоновые, поливинилхлоридные, изготовленные на основании поликарбонатов и полисульфонов.

11.3 Устройство мембранных аппаратов

Аппараты для обратного осмоса и ультрафильтрации бывают периодического и непрерывного действия. Аппараты периодического действия применяются, как правило, только в лабораторной практике. В промышленности работают проточные аппараты непрерывного действия.

Мембранные аппараты имеют большую удельную площадь поверхности разделения, просты в сборке и монтаже, надежны в работе. Перепад давления в аппаратах небольшой.

Недостатком аппаратов для обратного осмоса является высокое рабочее давление, что требует специальных уплотнений у трубопроводов и арматуры, рассчитанных для высокого давления.

По способу расположения мембран аппараты делятся на аппараты типа "фильтр-пресс" с плоскокамерными фильтрующими элементами, аппараты с цилиндрическими и рулонными элементами и аппараты с мембранами в виде полых волокон.

Перечисленные аппараты состоят из отдельных секций или модулей, что позволяет собирать аппараты с различной площадью поверхности разделения.

Аппарат типа "фильтр-пресс" по конструкции напоминает фильтр для обычного фильтрования, является наиболее простым мембранным аппаратом.

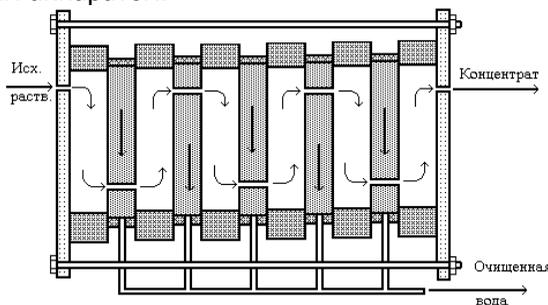


Рисунок 11.3.1 - Мембранный фильтр-пресс

Основой этой конструкции (рис.11.3.1) является фильтрующий элемент, состоящий из двух мембран, уложенных по обе сто-



Процессы и аппараты пищевых производств

роны листов "подложки", изготовленных из пористого материала, например, полимерного. Листы подложки имеют отверстия для прохода жидкости. Эти листы расположены на расстоянии от 0.5 до 5 мм, образуя межмембранное пространство для разделяемого раствора. Пакет фильтрующих элементов зажимается между двумя плитами и стягивается болтами. Фильтруемый раствор последовательно проходит через все фильтрующие элементы и концентрируется. Концентрат и фильтрат непрерывно удаляются из аппарата. Применяются в установках для выделения белков из подсырной сыворотки, а также для ультрафильтрации обезжиренного молока и творожной сыворотки. Производительность по сыворотке 5..6.8 м³/ч, по концентрату - 0.16...0.3 м³/ч.

Аппарат с цилиндрическими фильтрующими элементами собирается из отдельных фильтрующих модулей (рис.11.3.2). Представляет собой сменный узел, собранный из полупроницаемой мембраны и дренажного каркаса. Дренажный каркас состоит из трубы и пористой подложки, исключающей вдавливание мембраны в дренажные трубы. Цилиндрические фильтрующие элементы изготавливаются трех типов: с расположением мембраны на внутренней поверхности дренажного каркаса, на внешней и с комбинированным расположением мембраны.

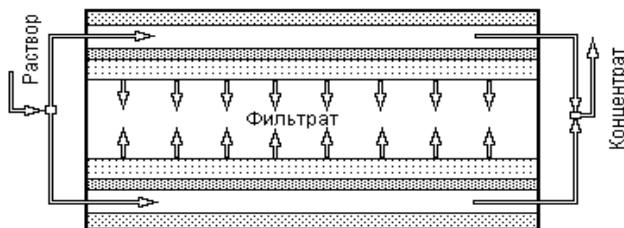


Рисунок 11.3.2 - Цилиндрический фильтрующий элемент

Преимущества аппарата с цилиндрическими фильтрующими элементами: малая материалоемкость из-за отсутствия напорного корпуса, небольшое гидравлическое сопротивление, возможность механической очистки фильтрующих элементов от осадка без разборки, надежность конструкции.

Недостатки: низкая удельная рабочая площадь поверхности фильтрации мембран, высокие требования к сборке элементов.

Эффективность применения мембранных процессов в пищевых производствах рассмотрим на примерах.

На рис.11.3.3 показана двухступенчатая схема установки концентрирования апельсинового сока, работающая с возвратом

Процессы и аппараты пищевых производств

фильтрата со второй ступени. Основными аппаратами являются мембранные фильтр-прессы. Материальный баланс процесса представлен на схеме. В результате ультрафильтрации концентрация продукта повышается в четыре раза.

Схема переработки молока с получением основных молочных продуктов представлена на рис.11.3.4 Основными технологическими стадиями являются сепарирование молока с получением масла, ультрафильтрация обезжиренного молока и обратный осмос. Из концентрата обезжиренного молока получают ассортимент молочных продуктов. Использование мембранных аппаратов при переработке молока позволяет решить проблему очистки сточных вод.

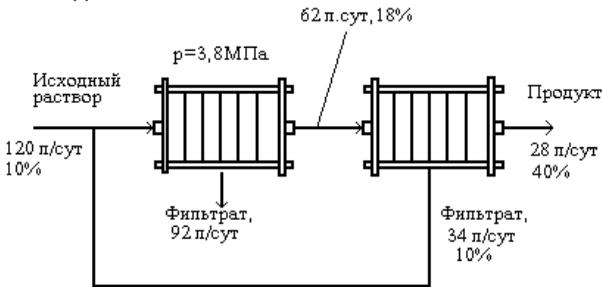


Рисунок 11.3.3 - Двухступенчатая схема установки для концентрации апельсинового сока

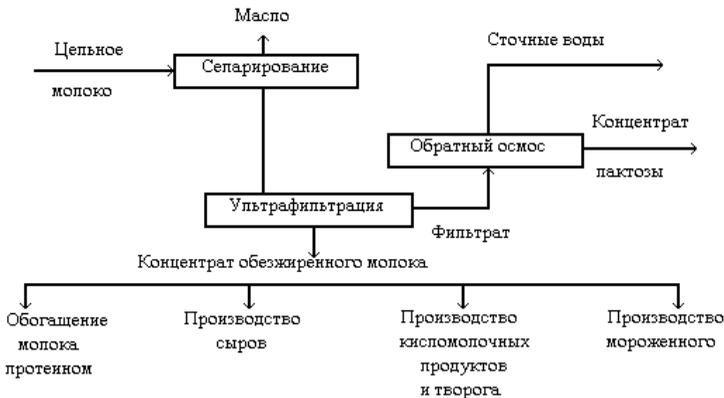


Рисунок 11.3.4 - Схема переработки молока



Контрольные вопросы и задания:

- 1) В чем сущность процесса обратного осмоса и ультрафильтрации? Каковы различия этих методов?
- 2) Для каких целей применяют обратный осмос и ультрафильтрацию в пищевой технологии?
- 3) Что является движущей силой процессов обратного осмоса и ультрафильтрации?
- 4) Чем принципиально отличается ультрафильтрация от обычного фильтрования?
- 5) Какие мембраны используются в процессах обратного осмоса и ультрафильтрации?
- 6) Какие конструкции аппаратов для проведения процессов обратного осмоса и ультрафильтрации применяются в пищевых производствах?



ЛЕКЦИЯ №12

ТЕПЛОБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

12.1 Теплопередача

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

Теплота - энергетическая характеристика процесса теплообмена, которая определяется количеством энергии, отдаваемой или получаемой телом в процессе теплообмена.

К теплообменным процессам относятся технологические процессы, скорость которых определяется скоростью подвода или отвода теплоты: нагревание, испарение, выпаривание, охлаждение, конденсация.

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

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

В процессе передачи участвуют не менее двух сред. Среда с более высокой температурой, отдающая при теплообмене теплоту, называется горячим теплоносителем, среда с более низкой температурой, воспринимающая теплоту, называется холодным теплоносителем (хладоагент). Теплоносители и хладоагенты должны быть химически стойкими, не вызывать коррозии аппаратуры, не образовывать отложений на стенках аппаратов.

Теплоносители в пищевой промышленности: насыщенный водяной пар, вода, дымовые газы. Хладоагенты: аммиак, фреоны, рассол хлорида кальция, воздух, азот.

Теплопередача между средами может происходить в установившихся (стационарных) и неуставившихся (нестационарных) условиях. При стационарном процессе поле температур в аппарате не изменяется во времени. При неуставившемся (нестационарном) процессе температуры изменяются во времени.

При тепловой обработке многих пищевых продуктов, например, теста, молока, сахарных растворов происходит изменение их физико-химических свойств, что вызывает, в свою очередь, изменение условий теплопередачи.

Основными кинетическими характеристиками процесса теплопередачи являются средняя разность температур, коэффициент теплопередачи, количество передаваемой теплоты.

Связь между количеством передаваемой теплоты и площадью поверхности теплообмена определяется основным уравне-



нием теплопередачи

$$dQ = KF\Delta t d\tau$$

которое для установившегося процесса имеет вид

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

где dQ - количество переданной теплоты; K - коэффициент теплопередачи между средами; F - поверхность теплообмена; Δt - разность температур между средами; $d\tau$ - продолжительность процесса.

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

Площадь поверхности теплообмена аппарата определяется по формуле

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

Передача теплоты может осуществляться теплопроводностью, тепловым излучением и конвекцией.

12.2 Теплопроводность

Теплопроводность - процесс переноса тепловой энергии в результате теплового движения и взаимодействия микрочастиц.

Поверхность тела, все точки которой имеют одинаковую температуру, называется изотермической. Предел отношения изменения температуры к расстоянию между изотермическими поверхностями по нормали называется градиентом:

$$gradt = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta t}{\Delta l} \right) = \frac{dt}{dl}$$

Основной закон теплопроводности Фурье, гласит, что количество теплоты dQ , переданное теплопроводностью, пропорционально градиенту температуры dt/dl , времени $d\tau$ и площади сечения dF , перпендикулярного направлению теплового потока:

$$dQ = -\lambda \left(\frac{dt}{dl} \right) F d\tau$$



Процессы и аппараты пищевых производств

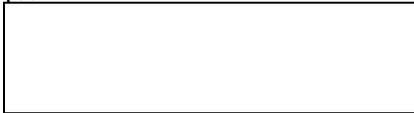
где λ - коэффициент теплопроводности, Вт/(м град).

Коэффициенты теплопроводности для некоторых материалов, применяемых в пищевом машиностроении [в Вт/(м град)]: сталь, чугун - 45; сталь нержавеющая - 17...21; алюминий - 200; медь - 350; латунь - 85; свинец - 35.

Для газов коэффициент теплопроводности находится в пределах 0.0058...0.5, для жидкостей - 0.08...0.7.

Для теплоизоляционных материалов коэффициент теплопроводности изменяется от 0.0116 до 0.006.

Дифференциальное уравнение теплопроводности, называемое также уравнением Фурье, описывает процесс распространения теплоты в твердом теле:



где c - удельная теплопроводность материала, кДж/(м град); ρ - плотность материала, кг/м³; $\frac{\lambda}{c\rho} = a$ - коэффициент температуропроводности, м²/ч или м²/с.

Уравнение, описывающее теплопроводность плоской стенки при установившемся тепловом режиме (рис.12.2.1), имеет вид:

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

где λ/δ - тепловая проводимость стенки.

В случае двухслойной стенки, например эмалированной или многослойной:

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

где n - количество слоев стенки.

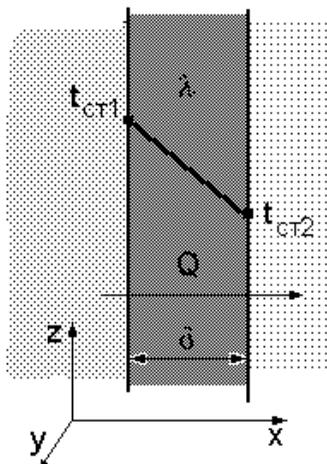


Рисунок 12.2.1 - Схема процесса передачи теплоты

12.3 Тепловое излучение

Из всей лучистой энергии, которая попадает на поверхность тела, часть ее поглощается телом Q_A , часть отражается Q_R , а часть проходит через тело Q_D .

В общем случае

$$\frac{Q_A}{Q} + \frac{Q_R}{Q} + \frac{Q_D}{Q} = 1$$

Абсолютно черных тел (вся падающая энергия поглощается), абсолютно прозрачных (вся энергия проходит через него) и абсолютно белых (вся энергия отражается) в природе нет. Приходится оперировать серыми. Закономерности теплового излучения описываются законами Стефана-Больцмана, Кирхгофа и Ламберта.

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

$$E = Q / F$$

Энергия излучения зависит от длины волны и температуры T .

Связь между лучеиспускательной способностью и температурой абсолютно черного тела выражается соотношением:

$$E = K \cdot T^4,$$



Процессы и аппараты пищевых производств

где $K = (4.19...5.67)10^{-8}$ Вт/(м² К) - константа излучения абсолютно черного тела.

$$\text{Для практических расчетов } E_0 = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4,$$

где $C_0 = 5.67$ Вт/(м²К) - коэффициент излучения абсолютно черного тела.

Величина C для серого тела всегда меньше величины C_0 . Отношение $C/C_0 = \varepsilon$ называется относительной излучательной способностью или степенью черноты тела.

С учетом этого закон теплового излучения серых тел записывается в виде:

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

Закон Кирхгофа устанавливает соотношение между лучеиспускательной и поглощательной способностью тел и формулируется так:

отношение лучеиспускательной способности тел и их поглощательной способности равно лучеиспускательной способности абсолютно черного тела при той же температуре и зависит только от температуры.

В формульном выражении

$$E = \frac{E_0 Q_A}{Q} \quad E_0 = \frac{EQ}{Q_A}$$

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

$$dQ = \frac{1}{\pi E d\phi \cos\varphi dF_1}$$

где $d\phi$ -телесный угол, под которым виден элемент из элемента dF_1 ; φ -угол, образованный прямой соединяющей элементы dF_1 и dF_2 нормалью к элементу dF_1 .

Лучистый теплообмен между двумя плоскими, параллельно расположенными телами рассчитывается по уравнению, полученному на основании закона Стефана-Больцмана:



$$Q_{1-2} = C_{1-2} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F$$

где Q_{1-2} - количество теплоты, передаваемой телом 1 телу 2; C_{1-2} - приведенный коэффициент излучения системы из тел 1 и 2; F - излучающая поверхность, принимаемая равной для

обоих тел.

$$C_{1-2} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_0}}$$

12.4 Конвективный теплообмен (теплоотдача)

Теплоотдачей называется процесс теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой.

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

При конвективном теплообмене теплота распространяется в потоке жидкости или газа от поверхности твердого тела или к его поверхности одновременно конвекцией и теплопроводностью. От поверхности твердого тела к потоку жидкости она распространяется через пограничный слой за счет теплопроводности, от пограничного слоя в ядро потока жидкости или газа - в основном конвекцией.

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

Вынужденная, или принудительная, конвекция возникает под действием насоса или вентилятора и определяется физическими свойствами среды, скоростью ее движения, формой и размерами канала, в котором движется поток. При вынужденной конвекции теплообмен происходит значительно интенсивнее, чем при естественной.

Основной закон теплоотдачи - закон Ньютона гласит: количество теплоты dQ , переданное от поверхности теплообмена к потоку жидкости (газа) или от потока к поверхности теплообмена,



Процессы и аппараты пищевых производств

прямо пропорционально площади поверхности теплообмена F , разности температур поверхности t_{ct} и ядра потока t_f (или наоборот) и продолжительности процесса $d\tau$:

$$dQ = \alpha(t_{cm} - t_f)F d\tau;$$

$$dQ = \alpha(t_f - t_{cm})F d\tau '$$

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

Размерность коэффициента теплоотдачи:

$$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

Если коэффициент теплоотдачи имеет постоянное значение вдоль всей поверхности теплообмена уравнения принимают вид:

$$Q = \alpha(t_{cm} - t_f)F;$$

$$Q = \alpha(t_f - t_{cm})F$$

в зависимости от того, передается теплота от стенки к омывающему стенку потоку или наоборот.

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

Дифференциальное уравнение конвективного теплообмена (уравнение Фурье-Кирхгофа):

$$\frac{Dt}{d\tau} = \frac{dt}{d\tau} + \frac{dt}{dx}v_x + \frac{dt}{dy}v_y + \frac{dt}{dz}v_z,$$

где Dt - субстанциональная производная выражающая изменение температуры элемента одновременно во времени и пространстве, связанное с перемещением элемента из одной точки в другую; v_x, v_y, v_z - скорости перемещения частицы.

Для решения этого уравнения необходимы граничные условия.

Найдены решения для простейших случаев. Во всех остальных случаях расчетные уравнения получают, используя методы теории подобия, из дифференциальных уравнений, приводя



Процессы и аппараты пищевых производств

их с помощью экспериментальных данных к конкретному виду. Используются следующие критерии.

Критерий Нуссельта характеризует условия на границе сред

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}$$

Критерий Фурье характеризует связь между скоростью изменения температурного поля, размерами канала, в котором происходит теплообмен, и физическими свойствами среды в нестационарных условиях:

$$Fo = \frac{\alpha \tau}{l^2}.$$

Критерий Пекле показывает соотношение между количеством теплоты, распространяемой в потоке жидкости или газа конвекцией, и теплопроводностью

$$Pe = \frac{vl}{a}.$$

Легко видеть, что критерий Пекле представляет собой произведение критериев Рейнольдса и Прандтля

$$Pe = \frac{vl}{a} = \frac{vl}{\nu} \frac{\nu}{a} = RePr,$$

где ν - кинематическая вязкость, m^2/s .

Критерий Прандтля характеризует поле теплофизических величин потока жидкости или газа

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\mu}{a\rho}$$

При теплообмене в условиях естественной конвекции в критериальное уравнения вводят *критерий Грасгофа*

$$Gr = \beta \frac{gl^3}{\nu^2} \Delta t$$

или Архимеда



Процессы и аппараты пищевых производств

$$Ar = \frac{gl^3 (\rho_x - \rho_z)}{\nu^2 \rho_x},$$

где β - температурный коэффициент объемного расширения жидкости или газа, град⁻¹; ν - кинематическая вязкость; Δt - разность температур горячих и холодных частиц; ρ_x, ρ_r - плотность холодной и горячей среды.

Из приведенных критериев подобия только критерий Нуссельта содержит искомый коэффициент теплоотдачи, не входящий в условия однозначности. Поэтому он является определяемым критерием подобия.

Критериальное уравнение конвективного теплообмена в общем виде:

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

При стационарном процессе теплообмена из критериального уравнения исключается критерий Фурье:

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

При вынужденной конвекции из критериального уравнения исключается критерий Грасгофа:

$$Nu = f(Re, Pr).$$

При естественной конвекции из критериального уравнения исключается критерий Рейнольдса:

$$Nu = f(Gr, Pr).$$

К расчетному виду уравнения приводятся на основании экспериментальных данных, полученных в конкретной гидродинамической и геометрической обстановке.

В условиях естественной конвекции используется критериальное уравнение

$$Nu = c(Gr, Pr)^n,$$

в котором значения c и n выбираются в зависимости от произведения $GrPr$:

$GrPr$	c	n
10^{-3}	0,45	0
$10^{-3} \dots 5 \cdot 10^2$	1,45	1/8



Процессы и аппараты пищевых производств

$5 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^7$	0,54	1/4
$2 \cdot 10^7$	0,135	1/3

При вынужденной конвекции теплоносителя в трубе коэффициент теплоотдачи определяется по следующим уравнениям:

для турбулентного режима ($Re > 10000$)

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} \left(\frac{Pr}{Pr_c} \right)^{0,25},$$

для ламинарного режима ($Re \leq 2320$)

$$Nu = 0,17 Re^{0,33} Pr^{0,43} Gr^{0,1} \left(\frac{Pr}{Pr_c} \right)^{0,25}$$

Приведенные уравнения описывают случаи теплообмена без изменения агрегатного состояния теплоносителя. Особенность процессов испарения и конденсации заключается в том, что теплота подводится или отводится от веществ при постоянной температуре и распространяется в двух фазах.

Для расчета коэффициентов теплоотдачи при изменении агрегатного состояния используют следующие уравнения

Для пленочной конденсации пара при ламинарном стекании пленки

$$\alpha = 2,044 \sqrt[4]{\frac{r \rho^2 \lambda^3}{\mu \Delta t H}},$$

где r - теплота конденсации, Дж/кг; ρ - плотность конденсата, кг/м³; λ - теплопроводность конденсата, Вт/(м·град); μ - коэффициент вязкости конденсата, Па·с; Δt - разность между температурой насыщенного пара и стенки, °С; H - высота вертикальной трубы или стенки.

В случае конденсации пара по горизонтальной трубе формула будет иметь вид:

$$\alpha = 0,724 \sqrt[4]{\frac{r \rho^2 \lambda^3}{\mu \Delta t D}},$$

где D - диаметр трубы.

Для пузырькового режима кипения в условиях естественной

КОНВЕКЦИИ

$$\alpha = 7,77 \cdot 10^{-2} \left(\frac{\rho_n r}{\rho_{жс} - \rho_n} \right)^{0,033} \left(\frac{\rho_{жс}}{\sigma} \right) \frac{\lambda_{жс}^{0,75} q^{0,7}}{\mu_{жс}^{0,43} c_{жс}^{0,12} T_{нас}^{0,37}}$$

где $\rho_{ж}$, ρ_n - плотности пара и жидкости; σ - поверхностное натяжение на границе раздела; $\lambda_{ж}$ - теплопроводность жидкости; q - удельная нагрузка; $\mu_{ж}$ - динамический коэффициент вязкости; $c_{ж}$ - теплоемкость жидкости; T - температура насыщения.

Для воды можно использовать формулу

$$\alpha = 6,87 q^{0,7} p^{0,4},$$

где p - давление, МПа.

Ориентировочные значения коэффициентов теплоотдачи для наиболее распространенных процессов теплообмена: нагревание и охлаждение газов - 10...50; нагревание и охлаждение органических жидкостей 50...1500; нагревание и охлаждение воды 200...10000; кипение воды 500...10000; конденсация водяных паров 4000...15000; конденсация паров органических жидкостей 500...2000

Связь коэффициента теплопередачи с коэффициентом теплоотдачи. Коэффициент теплопередачи рассчитывается на основании коэффициентов теплоотдачи, вычисленных по критериальным уравнениям.

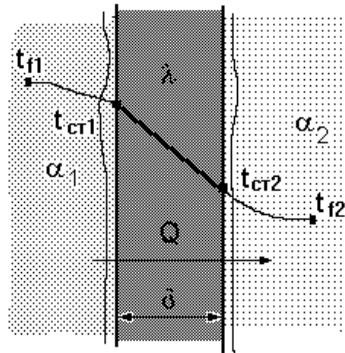


Рисунок 12.4.1 - Теплопередача через стенку

Рассмотрим процесс теплопередачи между теплоносителями, разделенными стенкой (рис.12.4.1). Пусть температура горя-



Процессы и аппараты пищевых производств

чего теплоносителя t_{f1} , холодного - t_{f2} . Температуры поверхностей стенки соответственно $t_{сr1}$ и $t_{сr2}$. Коэффициенты теплоотдачи для горячего теплоносителя α_1 , холодного - α_2 .

При установившемся процессе количество теплоты Q , передаваемое в единицу времени через площадку F от ядра потока горячего теплоносителя к стенке, равно количеству теплоты, передаваемому через стенку теплопроводностью и от стенки к ядру потока холодного теплоносителя. Это количество теплоты можно определить:

по закону Ньютона $Q = \alpha_1(t_{f1} - t_{сr1})F$;

по закону Фурье $Q = \lambda/\delta (t_{сr1} - t_{сr2})F$;

по закону Ньютона $Q = \alpha_2(t_{сr2} - t_{f2})F$.

Из этих уравнений получают разности температур или частные температурные напоры:

$$t_{f1} - t_{-I} = \frac{Q}{\alpha_1 F};$$

$$t_{-I} - t_{-2} = \frac{Q}{F} \frac{\delta}{\lambda};$$

$$t_{-2} - t_{f2} = \frac{Q}{\alpha_2 F}$$

Складывая левые и правые части этих уравнений, получают разность температур теплоносителей и определяют количество теплоты, прошедшее через стенку от горячего теплоносителя к холодному:

$$Q = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} F$$

Величина

$$R = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}$$

называется общим термическим сопротивлением теплоте-



Процессы и аппараты пищевых производств

редачи.

В случае многослойной стенки в уравнение вместо δ/λ подставляется сумма термических сопротивлений каждого слоя стенки

$$R = \frac{1}{\alpha_1} + \sum_1^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2},$$

где n - количество слоев стенки; i - порядковый номер стенки.

Следует иметь в виду, что величина коэффициента теплопередачи всегда меньше минимального коэффициента теплоотдачи.

Контрольные вопросы и задания:

- 1) Какие технологические процессы относятся к теплообменным?
- 2) Каким уравнением определяется связь между количеством переданной теплоты и размерами теплообменной аппаратуры?
- 3) Какой процесс называется теплопередачей? Каким законом он описывается?
- 4) В чем заключается смысл закона теплопроводности Фурье?
- 5) Какими законами описывается процесс передачи теплоты излучением?
- 6) Какой процесс называется теплоотдачей и каким законом он описывается?
- 7) Какая существует связь между величинами коэффициента теплопередачи и коэффициента теплоотдачи?



ЛЕКЦИЯ №13

ТЕПЛОБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ.

НАГРЕВАНИЕ, ИСПАРЕНИЕ, ОХЛАЖДЕНИЕ И

КОНДЕНСАЦИЯ

13.1 Виды тепловых процессов. Конденсация

Нагревание - это процесс повышения температуры материалов подводом к ним теплоты. В пищевой промышленности нагревание осуществляют горячей водой или другими жидкими теплоносителями, насыщенным водяным паром, топочными газами и электрическим током в теплообменниках различного типа.

Вода применяется для нагревания и пастеризации пищевых продуктов при температурах ниже 100°C . Для нагревания до температур выше 100°C применяют перегретую воду, находящуюся под избыточным давлением. Вода является доступным и дешевым, не агрессивным теплоносителем, имеющим высокую теплоемкость и коэффициент теплоотдачи. Обычно обогрев водой осуществляется через разделяющую теплоноситель и продукт стенку аппарата.

При нагревании водой и другими органическими теплоносителями (масло) часто применяют циркуляционный способ обогрева. Горячая вода либо другой теплоноситель принудительно или естественно циркулирует между нагревателем и теплообменником. Более эффективна принудительная циркуляция.

Другим способом нагревания горячими жидкостями является обогрев с помощью обогревательных бань, представляющих собой аппараты с рубашками. Рубашка нагревается топочными газами, с помощью электрообогрева или насыщенным водяным паром высокого давления, подаваемого в змеевик.

Из высокотемпературных жидкостей применяют минеральные масла (до $250...300^{\circ}\text{C}$), тетрахлордифенил (до 300°C), глицерин, кремнийорганические соединения и др. Наибольшее распространение получила дифенильная смесь, которая используется для нагревания по циркуляционному способу, а также для заполнения обогревательных бань. Коэффициент теплоотдачи для жидкой дифенильной смеси в условиях естественной циркуляции составляет $200...350 \text{ Вт} / (\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C})$. Дифенильная смесь обеспечивает обогрев до $260...400^{\circ}\text{C}$.

Расход воды или другого теплоносителя на нагревание определяют из теплового баланса:



Процессы и аппараты пищевых производств

$$G_B c_B t_{B.H} + G_n c_n t_{n.H} = G_B c_B t_{B.K} + G_n c_n t_{n.K} + Q_n$$

где G_B и G_n - количество соответственно воды и продукта, кг/ч; c_B и c_n - теплоемкости воды и продукта, кДж/(кг·°C); $t_{B.H}$ и $t_{n.H}$ - начальные температуры соответственно воды и продукта; $t_{B.K}$ и $t_{n.K}$ - конечные температуры соответственно воды и продукта; Q_n - потери теплоты в окружающую среду, кДж/ч.

Нагревание водяным насыщенным паром имеет следующие достоинства:

большое количество теплоты, выделяющейся при конденсации водяного пара (2264...2024 кДж на 1 кг конденсирующегося пара при абсолютных давлениях 0.1...1.0 МПа);

высокий коэффициент теплоотдачи от конденсирующегося пара к стенке - порядка 20000...40000 кДж/(м² ч·°C));

равномерность обогрева.

При нагревании водяным насыщенным паром применяют два способа: нагревание "глухим" насыщенным паром и "острым" паром.

При нагревании "глухим" паром теплота от конденсирующегося насыщенного пара к нагреваемому теплоносителю передается через разделяющую их стенку. Греющий "глухой" пар конденсируется и выводится из парового пространства теплообменника в виде конденсата. При этом температура конденсата принимается равной температуре насыщенного греющего пара.

Расход пара (в кг/ч) при нагревании жидкости определяют из теплового баланса:

$$D = \frac{G_c(t_k - t_n) + Q_n}{i'' - i'}$$

где D - расход пара, кг/ч; G_c - расход жидкости, кг/ч; c - теплоемкость жидкости, кДж/(кг·°C); t_n, t_k - начальная и конечная температура жидкости, град.; i'', i' - энтальпии соответственно греющего пара и конденсата, кДж/кг.

Для того чтобы пар полностью конденсировался в паровом пространстве теплообменника, на отводной линии конденсата устанавливают конденсатоотводчики, которые пропускают конденсат и задерживают пар. Пар таким образом полностью конденсируется.

При нагревании "острым" паром водяной пар вводится непосредственно в нагреваемую жидкость. Пар конденсируется и отдает теплоту нагреваемой жидкости, а конденсат смешивается с жидкостью. Пар вводится через барботер, представляющий собой



Процессы и аппараты пищевых производств

трубу с отверстиями, свернутую по спирали Архимеда или по окружности.

Расход "острого" пара определяют из теплового баланса:

$$D = \frac{G_c(t_k - t_n) + Q_n}{i'' - ct_k}$$

Нагревание "острым" паром применяется в тех случаях, когда допустимо разбавление нагреваемой среды водой. Этот способ часто применяют для нагревания воды и водных растворов.

Недостатками обогрева топочными газами, образующимися при сжигании твердого, жидкого или газообразного топлива, являются: низкий коэффициент теплоотдачи, равный 60...120 кДж/(м² ч °С); значительные температурные перепады и неравномерный нагрев; сложность регулирования температуры; окисление стенок аппаратов.

Кроме топочных газов, полученных в специальных печах (топках), используют также отработанные газы от печей, котлов и т.д. с температурой 300...500°С. Применение отработанных газов не требует дополнительного расхода топлива, поэтому использование их для нагревания весьма рационально.

Нагревание электрическим током осуществляется в электрических печах сопротивления и косвенного действия.

В печах прямого действия тело нагревается при прохождении через него электрического тока.

Нагревание токами высокой частоты основано на том, что при воздействии на диэлектрик переменного тока высокой частоты происходит нагревание его. Количество выделяющейся теплоты пропорционально квадрату напряжения и частоте тока. Обычно применяют частоту 1...100 МГц.

Достоинствами ВЧ нагревания являются: непосредственное выделение теплоты в нагреваемом теле; равномерный и быстрый нагрев всей массы материала до требуемой температуры; простота регулирования процесса.

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

Количество теплоты, которое необходимо подвести в процессе нагревания электрическим током:

$$Q_3 + Gct_n = Gct_k + Q_n,$$

где Q_3 - количество выделенной теплоты; G_c - количество перерабатываемого в обогреваемом аппарате продукта,



Процессы и аппараты пищевых производств

кг/ч; c - теплоемкость продукта, кДж/(кг град.); t_n, t_k - начальная и конечная температура продукта, град; Q_n - потери тепла в окружающую среду, кДж/ч.

Мощность нагревательных элементов (в кВт)

$$N = Q_n / 3600.$$

Испарение - процесс превращения жидкости в пар путем подвода к ней теплоты. Наиболее эффективно испарение жидкостей происходит при кипении. Испарение в пищевой технологии используется для охлаждения и опреснения воды, концентрирования растворов, например сахарных, и для разделения жидких смесей. Испарение проводят в испарителях.

Аппараты, применяемые для опреснения воды, называются опреснителями, для повышения концентрации растворов - выпарными аппаратами.

Расход теплоты на испарение (в кДж):

$$Q = Wr,$$

где W - количество испаренной жидкости, кг; r - теплота парообразования.

Для испарения 1 кг воды при атмосферном давлении следует затратить 2264 кДж.

Охлаждение - процесс понижения температуры материалов путем отвода от них теплоты. Для охлаждения газов, паров и жидкостей до 25...30 °С в пищевой технологии используют воду и воздух. Для охлаждения продуктов до низких температур используют низкотемпературные хладагенты - холодильные рассолы, фреоны, аммиак, диоксид серы, жидкий азот и т.п.

Охлаждение водой осуществляется в теплообменниках, в которых теплоносители разделены стенкой либо обмениваются теплотой при смешивании. Например, газы охлаждают разбрызгиванием в них воды.

Для охлаждения применяют обычную воду с температурой 15...25°С либо артезианскую с температурой 8...12°С. Для экономии используют оборотную воду, охлажденную за счет ее испарения в градирнях. Обратная вода имеет температуру, достигающую летом до 30°С.

Расход воды на охлаждение W (кг/ч):

$$W = \frac{Gc(t_n - t_k) - Q_n}{c_w(t_{w,k} - t_{w,n})}$$

где G - количество охлаждаемого теплоносителя, кг/ч; c, c_w - теплоемкости теплоносителя и воды, кДж/(кг°С); t_n, t_k - начальная и конечная температура теплоносителя, °С ;



Процессы и аппараты пищевых производств

$t_{в.н}$, $t_{в.к}$ - начальная и конечная температура охлаждающей воды, град.; Q - потери теплоты в окружающую среду, кДж/ч.

Охлаждение льдом применяется для охлаждения ряда продуктов, например мороженого, до температуры близкой к нулю. Для определения продолжительности охлаждения используют экспериментальные данные.

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

Искусственное охлаждение воздухом применяется для охлаждения воды в градирнях. Охлаждение происходит не только за счет теплообмена, но в значительной степени за счет испарения части жидкости.

Конденсация - переход вещества из паро- или газообразного состояния в жидкое путем отвода от него теплоты. Конденсация происходит в конденсаторах. Процессы конденсации широко применяют в пищевой технологии для сжижения различных веществ.

Конденсацию можно проводить при отводе теплоты от конденсируемых веществ с помощью охлаждающего теплоносителя, отделенного стенкой, либо при непосредственном смешении конденсируемых паров с охлаждающим теплоносителем - водой. В первом случае имеет место поверхностная конденсация, во втором - конденсация смешением.

Количество теплоты, выделяемое при конденсации, определяется по формуле:

$$Q = Dr,$$

где D - количество конденсирующегося пара, кг; r - теплота конденсации, кДж/кг.

Поверхностная конденсация осуществляется в теплообменниках, называемых поверхностными конденсаторами.

Расход охлаждающей воды (кг/ч):

$$W = \frac{D(i - c_{\kappa} t_{\kappa}) - Q_n}{c_{\epsilon} (t_{в.к} - t_{в.н})},$$

Энтальпия поступающего перегретого пара (в кДж/кг):

$$i = c_{\epsilon} (t_{\epsilon} - t_{\epsilon-}) + \dot{h} + \dot{h} t_{\epsilon-},$$

где D - количество пара, кг/ч; i - энтальпия пара, кДж/кг; $c_{в}, c_{\kappa}, c_{\epsilon}$ - теплоемкости воды, конденсата и перегретого пара кДж/(кг $^{\circ}$ C); $t_{в.к}$, $t_{в.н}$ - начальная и конечная температура воды, $^{\circ}$ C;



Процессы и аппараты пищевых производств

t_k - температура конденсата на выходе, °С; $t_{нас}$ - температура насыщения (конденсации) пара, °С, Q_n - потери теплоты в окружающую среду, кДж/ч; t_n - температура поступающего перегретого пара, °С; r - теплота конденсации пара (теплота испарения жидкости), кДж/кг.

Конденсация при смешивании теплоносителей осуществляется в мокрых и сухих конденсаторах.

В мокрых конденсаторах охлаждающую воду, конденсат и неконденсирующиеся газы, например воздух, выводят из нижней части конденсатора с помощью мокровоздушного насоса.

В сухих конденсаторах охлаждающая вода вместе с конденсатом выводится из нижней части, а воздух отсасывается вакуум-насосом из верхней части конденсатора.

Мокрые и сухие конденсаторы делятся на прямоточные и противоточные.

13.2 Устройство теплообменной аппаратуры

Теплообменники отличаются разнообразием конструкций, которое объясняется назначением аппаратов и условиями проведения процесса. По принципу действия теплообменники делятся на рекуперативные, регенеративные и смешительные (градирни, скрубберы, конденсаторы смешения и т.д.).

В рекуперативных теплообменниках теплоносители разделены стенкой, и теплота передается от одного теплоносителя к другому через разделительную стенку.

В регенеративных теплообменниках одна и та же теплообменная поверхность омывается попеременно горячим и холодным теплоносителем.

Теплообменная поверхность, аккумулируя теплоту горячего теплоносителя, передает ее холодному теплоносителю.

В смешительных аппаратах передача теплоты происходит при непосредственном взаимодействии теплоносителей.

Рекуперативные теплообменники в зависимости от конструкции разделяются на кожухотрубные, типа "труба в трубе", змеевиковые, пластинчатые, спиральные, оросительные и аппараты с рубашками.

Кожухотрубный вертикальный одноходовой теплообменник с неподвижными трубчатыми решетками (рис.13.2.1) состоит из цилиндрического корпуса, который с двух сторон ограничен приваренными к нему трубчатыми решетками с закрепленными в них греющими трубами.

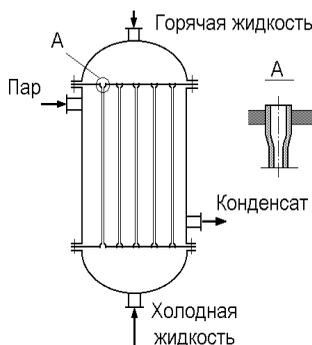


Рисунок 13.2.1 - Схема кожухотрубного теплообменника

Пучок труб делит весь объем корпуса на трубчатое пространство, заключенное внутри греющих труб, и межтрубное. К корпусу присоединены два днища, для ввода и вывода теплоносителей, корпус и днище имеют патрубки. Теплообмен между теплоносителями происходит через стенки труб.

С целью интенсификации теплообмена в кожухотрубных теплообменниках пучок труб секционируют. По секциям теплоноситель проходит последовательно.

Кожухотрубные теплообменники надежно работают при разностях температур 25...30 °С. При более высоких разностях возникают температурные напряжения, которые могут привести к выходу теплообменника из строя. Компенсировать температурные удлинения можно различными способами, например, используя U-образные трубы

Теплообменники типа "труба в трубе" (рис.13.2.2) состоят из ряда наружных труб большого диаметра и расположенных в них труб меньшего диаметра.

В этих теплообменниках достигаются высокие скорости теплоносителей как в трубах, так и в межтрубном пространстве. При необходимости создания больших площадей поверхностей теплопередачи теплообменник составляют из нескольких секций, получая батарею.



Процессы и аппараты пищевых производств

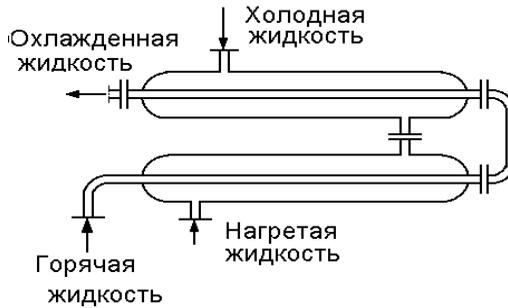


Рисунок 13.2.2 - Теплообменник типа "труба в трубе"

Достоинствами теплообменников этого типа являются высокий коэффициент теплопередачи вследствие большой скорости обоих теплоносителей, простота изготовления. Недостатки: высокая металлоемкость, трудности очистки и громоздкость.

Теплообменники "труба в трубе" применяются при небольших расходах теплоносителей для теплообмена между двумя жидкостями и между жидкостью и конденсирующимся паром.

Погружные змеевиковые теплообменники представляют собой трубу, согнутую в виде змеевика и погруженную в аппарат с жидкой средой (рис.13.2.3). Теплоноситель движется внутри змеевика. Достоинством змеевиковых теплообменников является простота изготовления. Погружные змеевиковые теплообменники применяют для охлаждения и нагрева конденсата, а также для конденсации пара.



Рисунок 13.2.3 - Погружной змеевиковый теплообменный

Регенеративные теплообменники состоят из двух секций, в одной из которых теплота передается от теплоносителя промежуточному материалу, а другой - от промежуточного материала технологическому газу.

Примером регенеративной теплообменной установки является установка непрерывного действия с циркулирующим зернистым материалом (рис.13.2.4), который выполняет функцию переносчика теплоты от горячих топочных газов к холодным технологическим. Установка состоит из двух теплообменников, каждый из которых представляет собой шахту с движущимся сверху вниз сплошным потоком зернистого материала. В нижней части каждого теплообменника имеется газораспределительное устройство для равномерного распределения газового потока по сечению теплообменника. Выгрузка зернистого материала из теплообменника происходит непрерывно с помощью шлюзового затвора. Охлажденный зернистый материал из второго теплообменника пневмотранспортной линией, подается в бункер - сепаратор, где частицы осаждаются и вновь поступают в первый теплообменник.

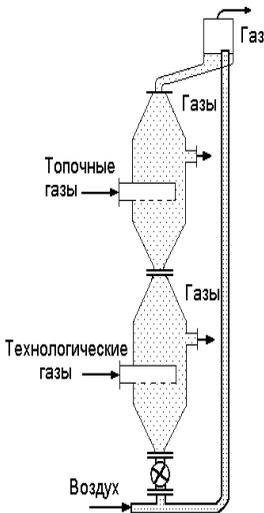


Рисунок 13.2.4 - Установка с циркулирующим зернистым материалом

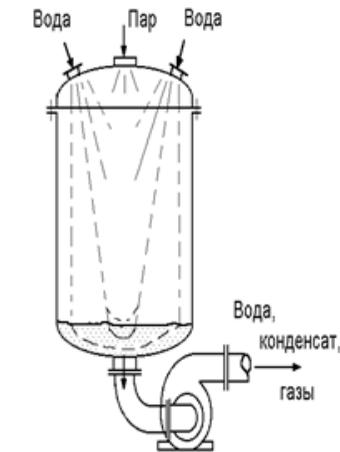


Рисунок 13.2.5 - Прямоточный конденсатор



Процессы и аппараты пищевых производств

Смесительные теплообменники бывают мокрого и сухого типов. Теплота в них передается от одного теплоносителя к другому при их смешивании.

Мокрый прямоточный конденсатор (рис.13.2.5) предназначен для конденсации пара водой. Охлаждающая вода вводится в конденсатор через сопла. Распыление воды значительно увеличивает площадь поверхности теплообмена между паром и водой. Конденсат, вода и несконденсированный пар из конденсатора удаляются мокровоздушным насосом.

13.3 Подбор теплообменников

При выборе конструкции теплообменного аппарата следует исходить из следующего: аппарат должен соответствовать технологическому процессу; быть экономичным; надежным; иметь низкую металлоемкость; материал теплообменника должен быть коррозионно-стойким в рабочих средах.

При решении вопроса о том, какой из теплоносителей пропускать по трубам, какой - с наружной стороны труб, надо придерживаться следующих правил:

для достижения большего коэффициента теплопередачи теплоноситель с меньшим коэффициентом теплоотдачи следует пропускать по трубам;

теплоноситель, оказывающий коррозионное действие на аппаратуру, целесообразно пропускать по трубам. В этом случае антикоррозийный материал нужен только для труб;

для уменьшения потерь теплоты теплоноситель с высокой температурой целесообразно пропускать по трубам;

теплоноситель, из которого выделяются осадки, рекомендуется пропускать с той стороны поверхности теплообмена, которую легче очистить;

теплоноситель с высоким давлением следует направлять в трубчатое пространство, чтобы корпус теплообменника не находился под высоким давлением.

Конструкция теплообменника выбирается из технико-экономических расчетов. При проектировании теплообменника для определенного технологического процесса задача расчета заключается в определении площади его теплообменной поверхности и габаритных размеров аппарата.

Для выяснения пригодности имеющегося теплообменника для определенного технологического процесса производят поверочный расчет. Исходными данными для него являются известная



Процессы и аппараты пищевых производств

площадь поверхности теплообмена F , габаритные размеры, заданная по технологическим условиям тепловая нагрузка Q , температурные условия, скорости движения и физические параметры теплоносителей. Расчет заключается в определении термического сопротивления при фактических условиях теплообмена и заданной тепловой нагрузке, определение запаса производительности аппарата.

Контрольные вопросы и задания:

- 1) Какие методы нагревания применяют в пищевых производствах?
- 2) В каких случаях применяют нагревание топочными газами?
- 3) Для каких целей применяют испарение в пищевой технологии?
- 4) Как классифицируют теплообменники по принципу действия?
- 5) На какие типы делятся рекуперативные теплообменники в зависимости от конструкции?
- 6) Приведите примеры регенеративных теплообменников.
- 7) Из чего исходят при выборе конструкции теплообменных аппаратов?



ЛЕКЦИЯ №14

МАССОБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ. ОСНОВЫ МАССОПЕРЕДАЧИ

14.1 Общие сведения

Массообменные процессы имеют место в процессах абсорбции, перегонки и ректификации, экстракции и выщелачивания, сушки, адсорбции, кристаллизации и др.

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

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

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

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

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

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

При *кристаллизации* происходит переход из жидкой фазы в твердую в результате возникновения и роста кристаллов в растворе.



14.2 Кинетика массопередачи

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

В массообмене участвуют, как минимум, три вещества: распределяющее вещество (или вещества), составляющее первую фазу;

распределяющее вещество (или вещества), составляющее вторую фазу;

распределяемое вещество (или вещества), которое переходит из одной фазы в другую.

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 происходит 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 определенная зависимость между концентрациями распределяемого вещества в фазах. Такие концентрации называются равновесными.

При равновесии концентрации \bar{X} соответствует равновесная концентрация Y_p и наоборот каждой концентрации \bar{Y} соответствует определенная равновесная концентрация X_p .

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

$$Y_p = F_1(\bar{X}); X_p = F_2(\bar{Y})$$

Эти зависимости определяются экспериментально и назы-



Процессы и аппараты пищевых производств

ваются равновесными зависимостями.

Отношение концентрации компонента в фазах в условиях равновесия называется коэффициентом распределения m .

$$m = \frac{Y_P}{X}$$

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

Согласно общему кинетическому уравнению

$$\sum Q_H = \sum Q_K + \sum Q_{\Pi}$$

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

$$\frac{dM}{Fd\tau} = K\Delta,$$

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

Нетрудно видеть, что $dM/Fd\tau$ является скоростью массопередачи, отнесенной к единице поверхности контакта фаз. Если dM отнесено к единице времени, имеем

$$dM = K\Delta dF$$

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

$$M = K \Delta F$$

Полученные уравнения называются *основными уравнениями массопередачи*. Согласно этим уравнениям *количество вещества, перенесенное из ядра одной фазы в ядро другой фазы, пропорционально разности его концентраций в ядрах фаз, площади поверхности фазового контакта и продолжительности процесса.*

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

Коэффициенты массопередачи в зависимости от единиц, в



Процессы и аппараты пищевых производств

которых выражены движущая сила и количество распределяемого вещества, могут выражаться в м/с, кг/(ед.дв.силы·м²·с), кмоль/(ед.дв.силы·м²·с).

14.3 Основные законы массопередачи

В процессах массопередачи следует различать несколько случаев массообмена: между потоком газа или пара и потоком жидкости; между потоками жидкости и твердой фазой; между потоком газа или пара и твердой фазой.

Основными законами массопередачи являются закон молекулярной диффузии (первый закон Фика), закон массоотдачи (закон Ньютона - Шукарева) и закон массопроводности.

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:

$$dM = -\frac{DdC}{dlFd\tau}$$

где dM - количество продиффундировавшего вещества; D - коэффициент пропорциональности или коэффициент диффузии; dC/dl - градиент концентрации в направлении диффузии; F - элементарная площадка, через которую происходит диффузия; $d\tau$ - продолжительность диффузии.

Коэффициент диффузии показывает, какое количество вещества диффундирует через поверхность в 1 м² в течение 1 часа при разности концентраций на расстоянии 1 м, равной единице.

Знак "минус" показывает, что при молекулярной диффузии концентрация уменьшается.

Размерность коэффициента диффузии

$$D = \frac{Ml}{FC\tau} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}} = \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$$

Значения коэффициента обычно берутся из справочников или находят по формулам:

для газов



Процессы и аппараты пищевых производств

$$D = 4,35 \cdot 10^{-2} \frac{T^{3/2}}{p(V_A^{1/3} + V_B^{1/3})^2} \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}},$$

для жидкостей
$$D = \frac{8,2 \cdot 10^{-12} T}{\mu V_A^{1/3}} \left(1 + \frac{3V_B}{V_A}\right)^{2/3},$$

где T - температура, К; p - давление, Па; V_A, V_B - мольные объемы взаимодействующих веществ; M_A, M_B - молекулярные массы веществ, кг/моль; μ - динамическая вязкость, МПа·с; A и B - опытные коэффициенты, зависящие от природы веществ.

Коэффициенты диффузии зависят от агрегатного состояния систем. Коэффициенты диффузии для газов имеют значения $(0,1...1,0) \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$. Они примерно на четыре порядка выше, чем для жидкостей.

Коэффициенты диффузии в газах почти не зависят от концентрации, в то время как коэффициенты диффузии в жидкости изменяются с изменением концентрации диффундирующего вещества.

Дифференциальное уравнение молекулярной диффузии (второй закон Флика) получают, рассмотрев материальный баланс по распределяемому веществу для элементарного параллелепипеда, выделенного в потоке одной из фаз (рис.14.3.1).

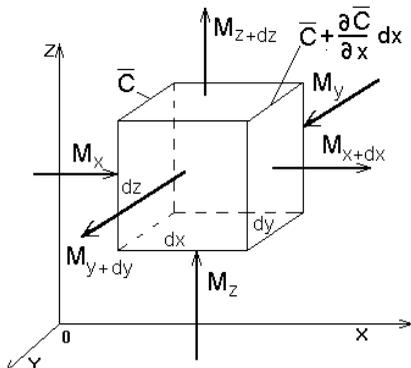


Рисунок 14.3.1 - Массоотдача в элементарном слое

Используя основной закон молекулярной диффузии (первый



Процессы и аппараты пищевых производств

закон Флика), можно получить дифференциальное уравнение молекулярной диффузии:

$$\frac{D\bar{C}}{d\tau} = D \left(\frac{d^2\bar{C}}{dx^2} + \frac{d^2\bar{C}}{dy^2} + \frac{d^2\bar{C}}{dz^2} \right)$$

Основной закон массоотдачи, который является аналогом закона Ньютона, был установлен русским ученым Щукаревым при изучении растворения твердых тел. Этот закон формулируется так:

количество вещества, перенесенного потоком от поверхности раздела фаз (контакта фаз) в воспринимающую фазу или в обратном направлении, прямо пропорционально разности концентраций у поверхности контакта фаз и в ядре потока воспринимающей фазы, площади поверхности контакта фаз и продолжительности процесса.

Примем, что распределяемое вещество М переходит из фазы G, в которой его концентрация выше равновесной, в фазу L.

Если концентрацию вещества в ядрах фаз принять y_f и x_r , а концентрация на поверхности раздела фаз - соответственно y_r и x_r , то процесс массоотдачи вещества из ядра фазы G к поверхности раздела фаз и от поверхности раздела фаз в ядро фазы L можно записать так:

$$dM = \beta_y (y_f - y_r) F d\tau,$$

$$dM = \beta_x (x_r - x_f) F d\tau,$$

где β_y, β_x - коэффициенты массоотдачи, характеризующие перенос вещества конвективными и диффузионными потоками, одновременно; y_r и x_r предполагаются равными равновесным, т.е. $y_r = y_p$ и $x_r = x_{pr}$

Размерность коэффициента массоотдачи

$$\beta = \left[\frac{M}{c} \right]$$

Коэффициент массоотдачи показывает, какое количество вещества передается от поверхности контакта фаз площадью в 1 м в ядро воспринимающей фазы или в обратном направлении в течение единицы времени при разности движущих сил, равной единице.

По физическому смыслу коэффициенты массоотдачи отличаются от коэффициентов массопередачи, но выражаются в одинаковых единицах.



Процессы и аппараты пищевых производств

Дифференциальное уравнение конвективной диффузии

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{C}}{\partial \tau} + \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} v_x + \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} v_y + \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} v_z = \\ = D \left(\frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (14.3.1)$$

Для полного описания процесса это уравнение дополняется уравнением, характеризующим краевые условия на границе раздела фаз, которое описывает молекулярную диффузию на поверхности раздела фаз и имеет вид

$$\beta \Delta \bar{C} = - \frac{D \partial \bar{C}}{\partial x} \quad (14.3.2)$$

где $\Delta \bar{C} = \bar{C}_2 - \bar{C}_1$ - движущая сила процесса.

Для получения диффузионных критериев подобия используют методы теории подобия. Из дифференциальных уравнений конвективной диффузии (14.3.1) и (14.3.2) получают:

диффузионный критерий Нуссельта

$$Nu_D = \frac{\beta l}{D},$$

диффузионный критерий Фурье

$$Fo_D = \frac{D \tau}{l^2},$$

диффузионный критерий Пекле

$$Pe_D = \frac{vl}{D} = Re Pr_D$$

Критерий Fo_D характеризует изменение скорости потока диффундирующей массы во времени и используется для характеристики нестационарных процессов диффузии.

Диффузионный критерий Прандтля

$$Pr_D = \frac{\nu}{D}$$

характеризует подобие полей физических величин и определяется только физическими свойствами вещества.

Найдя критерии подобия, характеризующие явление массообмена, запишем критериальное уравнение конвективной диффу-

ЗИИ

$$f(\text{Re}; Gr; Nu_d \text{Pr}_d \text{Fo}_d) = 0$$

Критерий Нуссельта в этом уравнении является определяемым в отличие от других критериев, которые являются определяющими, т.е. составленными целиком из параметров, входящих в условие однозначности. Коэффициент массоотдачи, входящий в критерий Нуссельта, не входит в условие однозначности и является искомой величиной.

В явном виде критериальное уравнение переписывается так:

$$Nu_d = f(\text{Re}, Gr, \text{Pr}_d, \text{Fo}_d)$$

Критерий Грасгофа в этом уравнении характеризует конвективную диффузию в условиях естественной конвекции.

В случае стационарных процессов из общего критериального уравнения исключается критерий Фурье и оно приобретает вид

$$Nu_d = f(\text{Re}, Gr, \text{Pr}_d)$$

При вынужденном движении можно пренебречь естественной конвекцией. В этом случае из уравнения выпадает критерий Грасгофа и уравнение приобретает вид

$$Nu_d = f(\text{Re}, \text{Pr}_d)$$

По значениям критерия Нуссельта, найденным по критериальным уравнениям, определяют коэффициент массоотдачи

$$\beta = \frac{Nu_d D}{l}$$

Между переносом массы, теплоты и механической энергии существует аналогия - эти процессы описываются однотипными дифференциальными уравнениями.

Из основного уравнения массопередачи получим

$$y_f - y_p = \frac{dM}{dF} \left(\frac{m}{\beta_x} + \frac{1}{\beta_y} \right)$$

Обозначив выражение в скобках через $1/K$, имеем

$$y_f - y_p = \frac{dM}{dF} \frac{1}{K}$$

Это общее дифференциальное сопротивление переносу, а правая часть - сумма диффузионных сопротивлений массоотдачи в фазах. Аналогично для фазы L (распределяемое вещество переходит из фазы G в фазу L) имеем



Процессы и аппараты пищевых производств

$$\frac{1}{K_x} = \frac{1}{m\beta_y} + \frac{1}{\beta_x}$$

Числовые значения коэффициентов массопередачи определяются значениями коэффициентов массоотдачи и углом наклона равновесной линии.

Контрольные вопросы и задания:

- 1) Какие признаки объединяют все массообменные процессы?
- 2) Каков физический смысл коэффициентов массопередачи и массоотдачи?
- 3) Какая существует связь между коэффициентами массопередачи и массоотдачи?
- 4) Какими законами описывается перенос вещества из ядра потока и поверхности раздела фаз?
- 5) Какой закон описывает молекулярную диффузию?
- 6) Почему в расчетной практике пользуются не дифференциальными уравнениями массопереноса, а критериальными?



ЛЕКЦИЯ №15

МАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ. АБСОРБЦИЯ

15.1 Материальный баланс и кинетические закономерности абсорбции

Абсорбцией называется процесс поглощения газов или паров (абсорбентов) из газовых или паровых смесей жидкими поглотителями - абсорбентами. Этот процесс является избирательным и обратимым, что позволяет применить его с целью получения растворов газов в жидкостях, а также для разделения газовых или паровых смесей.

После абсорбции одного или нескольких компонентов из газовой или паровой смеси, как правило, проводят десорбцию, т.е. выделение этих компонентов из жидкости. Таким образом осуществляют разделение газовой смеси.

Имеет место физическая абсорбция и хемосорбция. При физической абсорбции при растворении газа не происходит химической реакции, при хемосорбции абсорбируемый газ вступает в химическую реакцию в жидкой фазе.

Процессы абсорбции в технике применяются для разделения углеводородных газов и получения соляной и сернистой кислот, аммиачной воды, очистки отходящих газов с целью улавливания ценных продуктов или обезвреживания газовых выбросов.

Аппаратурно-технологическое оформление абсорбции не сложно, поэтому процессы абсорбции широко используются в технике.

Аппараты для проведения процессов абсорбции называются абсорберами.

При взаимодействии газа с жидкостью возникает система, состоящая из двух фаз (Ф-2) и трех компонентов - распределяемого вещества и двух веществ носителей (К-3).

Согласно правилу трех фаз такая система имеет три степени свободы:

$$C=K+2-F=3+2-2=3$$

Тремя основными параметрами, определяющими фазовое равновесие в системе, являются давление, температура и концентрация. В этом случае можно произвольно изменять общее давление p , температуру t , концентрацию x распределяемого вещества в одной из фаз. При постоянных температуре и давлении, что имеет место в процессах абсорбции, каждой концентрации распределяемого вещества в одной из фаз соответствует строго



Процессы и аппараты пищевых производств

определенная концентрация в другой.

В условиях равновесия при $t = \text{const}$ зависимость между равновесными концентрациями выражается, законом Генри, который гласит:

при данной температуре мольная доля газа в растворе прямо пропорциональна парциальному давлению газа над раствором:

$$p = Ex \text{ или } x = p/E, \quad (15.1.1)$$

где p - парциальное давление газа равновесное с раствором, имеющим концентрацию x , доли моля; E - константа Генри.

Константа Генри зависит от природы растворяющегося вещества абсорбтива, абсорбента и температуры:

$$\ln E = -\frac{q}{RT} + C,$$

где q - теплота растворения газа, кДж/кмоль; $R = 8.325$ кДж/(кмоль · град)-универсальная газовая постоянная; T - абсолютная температура, К; C - постоянная, зависящая от природы газа и жидкости и определяемая опытным путем.

Из равенства видно, что с ростом температуры растворимость газов в жидкостях уменьшается. Парциальное давление растворяемого газа в газовой фазе, соответствующее равновесию, может быть заменено равновесной концентрацией. Согласно закону Дальтона, парциальное давление компонента в газовой смеси равно общему давлению, умноженному на мольную долю этого компонента в смеси, т.е.

$$p = Py \text{ и } y = p/P, \quad (15.1.2)$$

где P - общее давление газовой смеси; y - концентрация распределяемого вещества в смеси, доли моля.

Сопоставляя уравнения (15.1.1) и (15.1.2) найдем

$$y = p/P = T/Px$$

или, обозначив константу фазового равновесия E/P через m , получим

$$y = mx$$

Уравнение показывает, что зависимость между равновесными концентрациями распределяемого компонента в газовой смеси и в жидкости выражается прямой линией, проходящей через начало координат, тангенс угла наклона которой равен m . Тангенс угла наклона зависит от температуры и давления. С увеличением давления и уменьшением температуры растворимость



Процессы и аппараты пищевых производств

газов в жидкости увеличивается (m снижается). Когда в равновесии с жидкостью находится смесь газов, то закону Генри может следовать каждый из газовых компонентов смеси.

Следует отметить, что закону Генри подчиняются сильно разбавленные растворы, а также растворы при небольших давлениях, которые по своим свойствам приближаются к идеальным. Для концентрированных растворов и больших давлений зависимость между равновесными концентрациями выражается кривой линией, вид которой определяется экспериментально.

15.2 Принципиальные схемы абсорбции

В технике используют следующие принципиальные схемы абсорбционных процессов: прямоточные, противоточные, одноступенчатые с рециркуляцией и многоступенчатые с рециркуляцией.

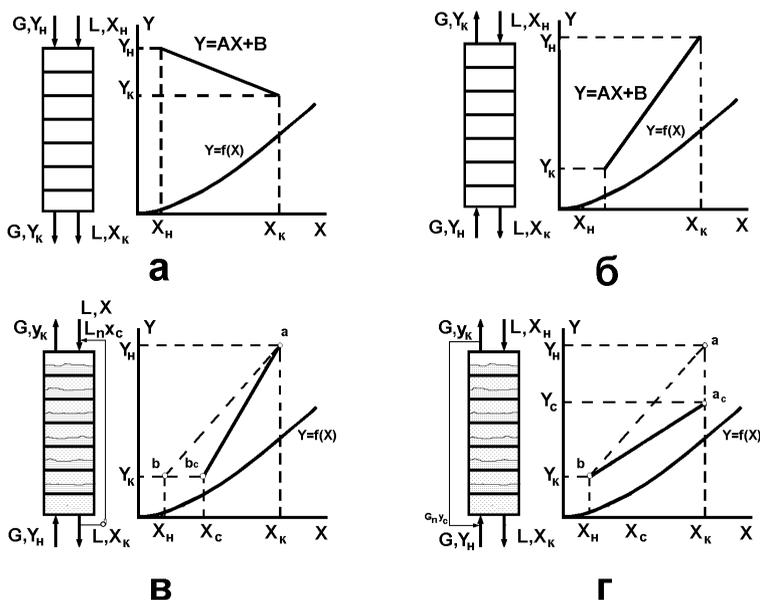


Рисунок 15.2.1 - Схемы абсорбции и изображение в u — x координатах: а - прямоточная; б - противоточная; в - с рециркуляцией абсорбента (жидкости); г - с рециркуляцией абсорбтива (газа)



Прямоточная схема взаимодействия веществ в абсорбере показана на рис. 15.2.1,а. В этом случае потоки газа и абсорбента движутся в одном направлении; при этом газ с большой концентрацией абсорбента приводится в контакт с жидкостью, имеющей меньшую концентрацию абсорбтива, а газ с меньшей концентрацией взаимодействует на выходе из абсорбера с жидкостью, имеющей большую концентрацию абсорбтива.

Противоточная система показана на рис. 15.2.1,б. В противоточном абсорбере в одном конце аппарата контактирует газ и жидкость, содержащие большие концентрации абсорбтива, а в другом противоположном конце - меньшие.

При противоточном процессе достигается большая конечная концентрация абсорбтива в абсорбенте, чем при прямоточном. Расход абсорбента также ниже. Однако ввиду того, что средняя движущая сила при противотоке ниже, то габариты противоточного абсорбера больше, чем прямоточного.

В схемах с рециркуляцией абсорбента или газовой фазы (рис. 15.2.1,в рис.15.2.1,г) происходит многократный проток абсорбента или газовой фазы через абсорбер. Жидкая фаза - абсорбент многократно возвращается в абсорбер, а газовая фаза проходит через абсорбер снизу вверх. Абсорбент подается в верхнюю часть абсорбера и движется противотоком к газовой фазе. В результате смешения свежего абсорбента с концентрацией x_n с выходящими из абсорбера его концентрация повышается до x_c .

В рециркуляционных схемах абсорбции количество абсорбента, проходящего через абсорбер, при том же расходе значительно больше, чем в схемах без рециркуляции. В результате увеличения скорости абсорбента повышается коэффициент массоотдачи в жидкой фазе, что приводит к увеличению коэффициента массопередачи.

Рециркуляция абсорбента целесообразна в случае абсорбции трудно растворимых газов, а рециркуляция абсорбтива, которая приводит к увеличению коэффициента массоотдачи в газовой фазе, - в случае абсорбции хорошо растворимых газов.

Многоступенчатые схемы с рециркуляцией могут включать прямоток, противоток, рециркуляцию жидкости и газа. В многоступенчатых схемах с рециркуляцией абсорбента достигаются высокие коэффициенты массопередачи и движущие силы процесса.

15.3 Конструкции абсорберов

Абсорбция протекает на поверхности раздела фаз. Поэтому абсорберы должны иметь развитую поверхность контакта фаз между газом и жидкостью. По способу образования этой поверхности абсорберы можно разделить на следующие четыре основные группы:

поверхностные и пленочные;

насадочные, в которых поверхность контакта фаз является поверхность растекающейся по специальной насадке жидкости;

барботажные абсорберы, в которых поверхность фаз создается потоками газа (пара) и жидкости;

распыливающие абсорберы, в которых поверхность контакта фаз создается вследствие разбрызгивания жидкости.

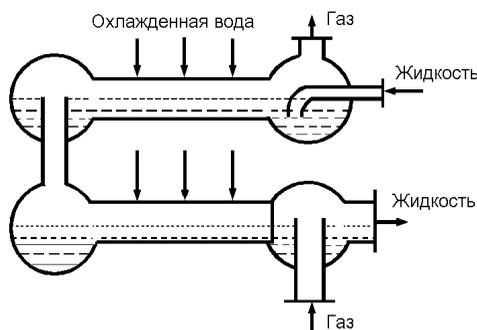


Рисунок 15.3.1 - Поверхностный абсорбер

В *поверхностных абсорберах* газ пропускается над поверхностью движущейся жидкости. Так как в поверхностных абсорберах поверхность контакта фаз невелика, то устанавливают несколько последовательно соединенных аппаратов, в которых газ и жидкость движутся противотоком друг к другу. На рис. 15.3.1 представлен оросительный абсорбер из горизонтальных труб, внутри которых протекает жидкость, а противотоком к ней движется газ. Уровень жидкости в трубах поддерживается с помощью порога. Охлаждение абсорбера происходит с поверхности орошаемой жидкости. Для равномерного распределения жидкости по поверхностям труб установлен зубчатый распределитель.

Пленочные абсорберы более компактны и эффективны, чем поверхностные. В пленочных абсорберах поверхность контакта фаз является поверхность стекающей жидкости.

На рис. 15.3.2 представлен абсорбер с плоскопараллельной насадкой. Насадка представляет собой вертикальные листы, ко-



Процессы и аппараты пищевых производств

торые разделяют объем абсорбера на ряд секций. Жидкость в абсорбер подается через трубу и с помощью распределительного устройства разливается по насадке, омывая листы с двух сторон. В зависимости от относительной скорости движения пленки и газа увеличивается коэффициент массоотдачи и поверхность контакта фаз за счет турбулизации пограничного слоя и образования вихрей.

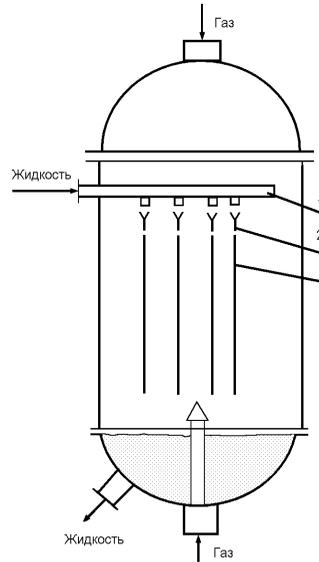


Рисунок 15.3.2 - Пленочный абсорбер: 1 - труба; 2 - распределительное устройство; 3 - плоскопараллельная насадка.

Средняя скорость течения пленки может быть вычислена из равенства

$$v_{\text{ср}} = \sqrt[3]{\frac{gL_y^2}{3\rho_{\text{ж}}\mu_{\text{ж}}}}$$

где L_y - удельная плотность орошения жидкости периметра слива, кг/(мс); $\rho_{\text{ж}}, \mu_{\text{ж}}$ - плотность в кг/м³ и вязкость в Па·с жидкости.

Скорость движения жидкости у поверхности пленки

$$v_n = 1,5v_{\text{ср}}$$

Толщина пленки



Процессы и аппараты пищевых производств

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{3L_g \mu_{ж}}{g \rho_{ж}^2}}$$

Режим движения пленки характеризует критерий Рейнольдса

$$Re = \frac{v_{ср} d_{эк} \rho_{ж}}{\mu_{ж}},$$

где $d_{эк}$ - эквивалентный диаметр пленки, м.

Эквивалентный диаметр пленки находится из соотношения

$$d_{эк} = 4\delta$$

Насадочные абсорберы получили широкое распространение в технике. Для того чтобы насадка работала эффективно, она должна удовлетворять следующим требованиям:

обладать большой удельной поверхностью;
оказывать небольшое гидравлическое сопротивление газовому потоку;

хорошо смачиваться рабочей жидкостью;

равномерно распределять жидкость по сечению абсорбера;

быть коррозиестойкой;

обладать высокой механической прочностью;

быть легкой;

иметь низкую стоимость.

Имеются различные типы насадок и способы их укладки в аппаратах. Наиболее распространенными насадками являются керамические кольца Рашига (рис. 15.3.3). Они изготавливаются размерами 15x15x2,5; 25x25x3; 50x50x5 мм.

Для колец Рашига удельная поверхность и свободный объем с увеличением размера насадок составляют соответственно 300, 204, 87.5 м²/м³ и насадки 0.7, 0.74, 0.785 м³/м².

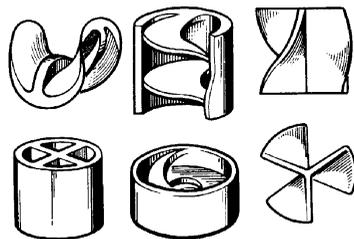


Рисунок 15.3.3 - Фасонные керамические

Тарельчатые барботажные колонны являются эффективны-



Процессы и аппараты пищевых производств

ми и наиболее распространенными аппаратами, внутри которых одна под другой размещено определенное количество горизонтальных перфорированных перегородок - тарелок, обеспечивающих течение жидкости сверху вниз, а пара - снизу вверх.

Тарельчатые колонны бывают с колпачковыми, клапанными, провальными ситчатыми тарелками, на которых имеет место неорганизованный перелив жидкости через отверстия, и с ситчатыми тарелками с переливными устройствами.

В колоннах с провальными тарелками газ проходит через отверстия тарелки и распределяется в слое жидкости, находящейся на тарелке, в виде струек и пузырьков.

На тарелках одновременно происходит барботажа пара через слой жидкости и частичный проход жидкости через отверстия тарелок. Такие конструкции тарелок очень чувствительны к расходу и давлению пара в колонне.

Более устойчиво работают ситчатые тарелки с переливными устройствами (рис. 15.3.4). Эти аппараты имеют горизонтальные тарелки, переливные устройства и пороги. Порог служит для разрушения пены, стекающей с вышерасположенной тарелки. Другой порог - для поддержания высоты столба жидкости на тарелке. Жидкость поступает на верхнюю тарелку, переливается и удаляется из нижней части аппарата. Газ (пар) вводится в нижнюю часть аппарата и перемещается вверх, распределяясь на каждой тарелке в виде пузырьков и факелов.

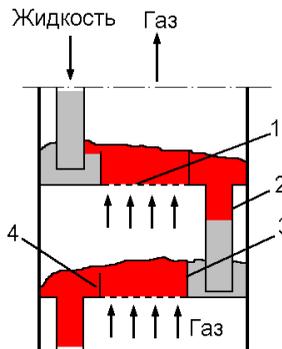


Рисунок 15.3.4 - Ситчатые тарелки с переливными устройствами:
1-тарелка; 2-переливное устройство; 3,4-пороги



Контрольные вопросы и задания:

- 1) Какова сущность абсорбции? Каким законам массопередачи подчиняется процесс абсорбции?
- 2) Какие факторы способствуют абсорбции и десорбции?
- 3) Какие схемы абсорбции применяют в технике?
- 4) Какие конструкции абсорберов применяются в промышленности?
- 5) Какие применяются насадки в абсорберах? Каким требованиям должны удовлетворять насадки?



ЛЕКЦИЯ №16

МАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ. АДсорбЦИЯ

16.1 Адсорбция. Общие сведения

Адсорбцией называется процесс поглощения газов или паров из газовых смесей, или растворенных веществ из растворов твердыми поглотителями — адсорбентами. Поглощаемое вещество называется адсорбтивом.

Характерной особенностью процессов адсорбции являются их избирательность и обратимость. Благодаря обратимости процесса возможно поглощение из парогазовых смесей или растворов одного или нескольких компонентов, а затем в определенных условиях выделение их из адсорбента.

Процесс, обратный адсорбции, называется десорбцией. Адсорбция широко распространена в различных отраслях промышленности для очистки и осушки газов, очистки и осветления растворов, разделения парогазовых смесей, для извлечения ценных летучих растворителей из их смеси с другими газами.

В пищевой технологии адсорбция используется для очистки диффузионного сока и сахарных сиропов в сахарном производстве, осветления пива и фруктовых соков, очистки от органических и других соединений спирта, водки, коньяка и вин, сиропов в крахмалопаточном производстве и др.

Различают физическую и химическую адсорбцию. Физическая адсорбция имеет место при взаимном притяжении молекул адсорбтива и адсорбента под действием сил Ван-дер-Ваальса. При физической адсорбции не возникает химического взаимодействия адсорбированного газа с адсорбентом.

При поглощении паров адсорбция может сопровождаться конденсацией паров. При этом поры адсорбента заполняются жидкостью, и происходит капиллярная конденсация, которая возникает вследствие снижения давления пара над вогнутым мениском жидкости в капиллярах адсорбента.

Химическая адсорбция, или хемосорбция, характеризуется образованием химической связи между молекулами поглощенного вещества и молекулами адсорбента, что является результатом химической реакции.

Характеристика и область применения адсорбентов. В пищевых производствах широко используются следующие адсорбенты: активные угли, силикагели (гель кремниевой кислоты), алюмогели (гидроокись алюминия), цеолиты, глины и другие при-



Процессы и аппараты пищевых производств

родные адсорбенты. Адсорбенты, которые непосредственно контактируют с продуктами, должны быть биологически безвредными, т.е. они должны быть нетоксичными и прочными, не засорять продукт. Адсорбенты характеризуются большой удельной поверхностью, отнесенной к единице массы вещества. Они имеют различные по диаметру поры, которые можно разделить на макропоры (более $2 \cdot 10^{-4}$ мм), переходные поры ($6 \cdot 10^{-6}$ – $2 \cdot 10^{-4}$ мм) и микропоры размером от $2 \cdot 10^{-6}$ до $6 \cdot 10^{-6}$ мм. От размера пор в большой степени зависит характер адсорбции. При адсорбции возможно образование слоев молекул поглощенного вещества толщиной в одну молекулу (мономолекулярная адсорбция), толщиной в несколько молекул так называемая полимолекулярная адсорбция.

Адсорбенты характеризуются поглотительной способностью (активностью), определяемой количеством вещества, поглощенного единицей массы или объема адсорбента.

Различают статическую и динамическую поглотительную способность. Статическая поглотительная способность определяется максимально возможным количеством вещества, поглощенного единицей массы (объема) адсорбента. Динамическая поглотительная способность определяется при пропускании адсорбтива через слой адсорбента и определяется количеством вещества, поглощенного единицей массы (объема) адсорбента от начала адсорбции до «проскока» адсорбтива через слой адсорбента.

Максимальная поглотительная способность адсорбента достигается при определенных температуре, давлении и концентрации адсорбируемого вещества и называется равновесной активностью. В промышленности адсорбенты используются в виде гранул размером 2 - 7 мм либо в порошкообразном состоянии с размером частиц 50 - 200 мкм.

Статика и кинетика адсорбции. Процессы адсорбции не отличаются по механизму от других процессов массопередачи в системе с твердой фазой. Процесс диффузии поглощаемого вещества в адсорбенте в общем случае описывается критериальным уравнением для систем с твердой фазой.

Процесс адсорбции может протекать в зависимости от формы изотерм адсорбции, природы и геометрических характеристик адсорбента, и слоя, концентрации адсорбтива, скорости парогазовой или жидкой смеси и других параметров процесса во внешне диффузионной или во внутри диффузионной области. Для разграничения адсорбции, протекающей во внешне диффузионной и внутри диффузионной областях, применяется диффузионный кри-



Процессы и аппараты пищевых производств

терий Био. Если $Bi_d \geq 30$, то скорость процесса определяется скоростью массопроводности внутри зерна адсорбента. При $Bi_d \leq 0,1$ скорость адсорбции зависит от скорости массоотдачи в газовой или жидкой фазе. В этом случае обычно используется основное уравнение массопередачи

$$dM = K_{yV} (y - y_p) dF,$$

в котором принимают $K_{yV} = \beta_{yV}$. Величины коэффициентов массоотдачи β_{yV} можно определять по следующим уравнениям:

$$Nu_D = 0,883 Re^{0,47} Pr_D^{0,33},$$

для зернистого адсорбента при ламинарном движении ($Re < 30$)
при турбулентном движении ($Re = 30 - 150$)

$$Nu_D = 0,53 Re^{0,54} Pr_D^{0,33}.$$

В этих уравнениях определяющим геометрическим размером в критериях Nu_D и Re является эквивалентный диаметр d_s .

Диффузионный критерий Нуссельта

$$Nu_D = \beta_{yV} d_s^2 / D;$$

критерий Рейнольдса
$$Re = \frac{v_0 d_s}{\nu},$$

диффузионный критерий Прандтля $Pr_D = \nu / D;$

где D — коэффициент диффузии в газовой или жидкой фазе; v_0 — фиктивная скорость потока; ν — кинематическая вязкость потока.

16.2 Адсорберы и схемы адсорбционных установок

Адсорберы по организации процесса делятся на аппараты периодического и непрерывного действия.

Адсорберы периодического действия бывают с неподвижным и псевдооживленным слоем адсорбента. Для очистки растворов в спиртовом и водочном производствах применяются также емкостные адсорберы с механическим перемешиванием.

Вертикальный цилиндрический адсорбер (рис.16.2.1) является наиболее распространенной конструкцией адсорберов периодического действия. Слой гранулированного адсорбента загружается через верхние люки на колосниковую решетку. Выгрузка адсорбента происходит через нижние люки. Такие адсорбе-



Процессы и аппараты пищевых производств

ры используются для адсорбционной очистки парогазовых смесей и жидких растворов. Для подачи исходных смесей и острого пара адсорбер снабжен соответствующими штуцерами. Жидкая исходная смесь, как правило, подается снизу вверх через кольцевую трубу. Парогазовая смесь может подаваться и сверху вниз. В этом случае при десорбции острый пар подается через кольцевую трубу.

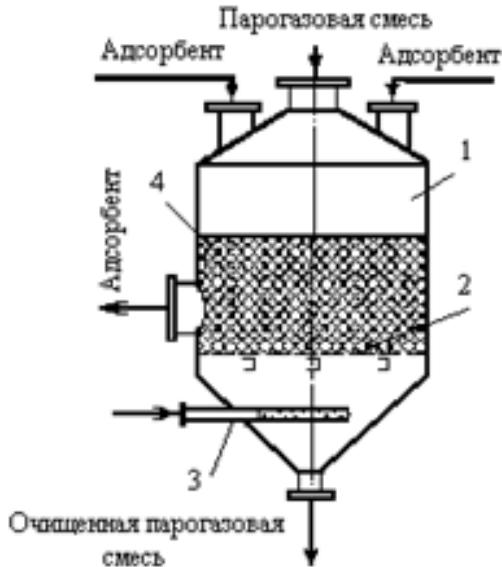


Рисунок 16.2.1 – Адсорбер с неподвижным слоем адсорбента: 1 – корпус; 2 – колосниковая решетка; 3 – кольцевая труба; 4 – адсорбент

Процесс в представленном адсорбере проходит в четыре стадии: адсорбция, десорбция, сушка, охлаждение адсорбента.

После отработки адсорбента возникает задача регенерации слоя поглотителя. Десорбция адсорбированного вещества из адсорбента является необходимой стадией технологического процесса, которая решает две задачи: извлечение вещества и регенерацию адсорбента.

Основным методом десорбции является вытеснение из адсорбента поглощенных компонентов с помощью веществ, например, насыщенного водяного пара, обладающих лучшей адсорбционной способностью. Для увеличения скорости десорбции процесс часто проводят при повышенных температурах.

Многоступенчатый та- рельчатый адсорбер с псевдо-

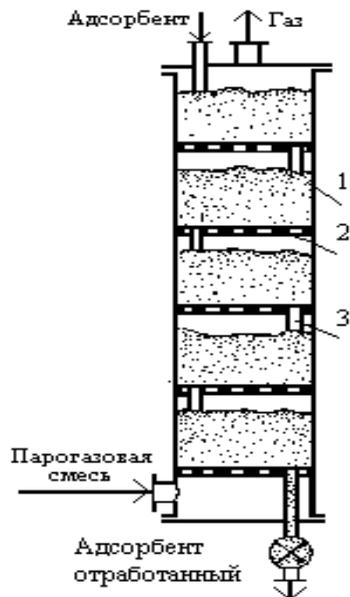


Процессы и аппараты пищевых производств

ожиженным слоем показан на рис. 16.2.2 Он представляет собой колонну, в которой расположены газораспределительные решетки с переливными патрубками, служащими одновременно затворами для газового потока. Адсорбент поступает в верхнюю часть адсорбера и перетекает с верхней на нижнюю тарелку. С нижней тарелки адсорбент через шлюзовой затвор выгружается из адсорбера. Исходная парогазовая смесь поступает в адсорбер снизу и удаляется через верхний патрубок.

Многоступенчатый адсорбер отличается от одноступенчатого тем, что работает по схеме, близкой к схеме работы аппаратов идеального вытеснения, что позволяет проводить процесс адсорбции в противотоке.

Применяются установки с адсорбцией в псевдоожиженном слое и десорбцией в движущемся слое адсорбента.



Рисунок

16.2.2 - Многосту-

пенчатый адсорбер с псевдоожиженным слоем: 1 - корпус; 2 - газораспределительная решетка; 3 - переливной патрубок; 4 - шлюзовой затвор

Установка для очистки сортировки в неподвижном слое активного угля показана на рис. 16.2.3 Сортировку фильтруют на песочных или керамических фильтрах, а затем осветляют в адсорберах. Масса угля в одном цилиндрическом адсорбере состав-



Процессы и аппараты пищевых производств

ляет от 250 до 300 кг. Уголь засыпается на распределительную решетку. Сортировку подают в низ адсорбера под распределительную решетку. Скорость подачи сортировок в адсорбер со свежим или регенерированным углем зависит от сорта водки и составляет от 30 до 60 дал/г. Адсорберы переключают на регенерацию 3 - 4 раза в год. Регенерацию отработанного активного угля проводят в адсорбере при температуре 115°C, пропуская насыщенный водяной пар через слой угля сверху вниз. При регенерации из одного адсорбера получают от 50 до 60 дал спиртового отгона крепостью 55 - 60%. Установка из двух периодически работающих адсорберов обеспечивает непрерывную работу установки. Продолжительность десорбции составляет 3 - 4 ч, расход пара - 4 кг на 1кг угля. После регенерации уголь охлаждают и подсушивают горячим воздухом.

На крупных заводах регенерацию угля проводят во вращающихся печах при температуре 800—850 °С. Потери угля при прокаливании составляют до 20%.

При очистке сортировки в адсорберах реакторного типа с механическим или пневматическим перемешиванием используется гранулированный уголь. Расход угля составляет 2 кг на 1000 дал водки. Адсорбция происходит в течение 30 мин при перемешивании суспензии. После адсорбции суспензия отстаивается, а затем фильтруется на рамных фильтрах и фильтр-прессах. Интенсификация адсорбционной очистки сортировки достигается при проведении адсорбции в псевдооживленном слое мелкозернистого активного угля. Сортировку подают под распределительную решетку через кольцевую перфорированную трубу, расположенную в нижней части цилиндрического адсорбера. При определенной скорости слой угля, расположенный на решетке, переходит в псевдооживленное состояние.

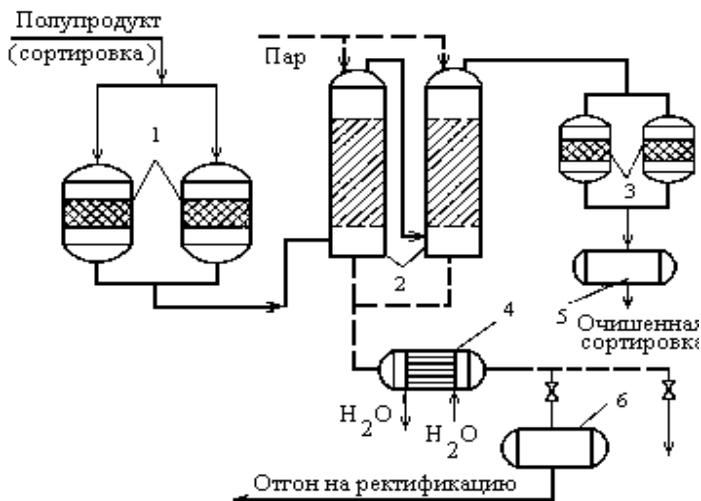


Рисунок 16.2.3 – Схема установки для очистки водно – спиртовой смеси в неподвижном слое активного угля: 1, 3 – фильтры, 2 – адсорберы, 4, 6 – емкости, 5 – холодильник - конденсатор

16.3 Ионообменные процессы и аппараты

Ионообменные процессы широко применяются для водо-подготовки: умягчения и обессоливания воды, очистки растворов, разделения смеси веществ и т. д. В сахарной промышленности иониты используются для очистки соков и сиропов. С помощью ионитов представляется возможным удалить из сахарных растворов почти все не сахаристые вещества. В виноделии иониты используются для удаления ионов железа и кальция, улучшения качества вин, в молочной промышленности - для очистки молока от ионов кальция и других металлов, в жировом производстве - для очистки растительного масла. Ионообменные процессы способны по технико-экономическим показателям конкурировать с процессами экстракции, ректификации и др.

Ионообменные процессы отличаются от адсорбционных тем, что происходит обмен ионами между ионитами и раствором. При этом происходит перемещение ионов из растворов к поверхности ионита, а ионы с поверхности ионита переходят в раствор.

В качестве ионитов используются твердые, практи-



Процессы и аппараты пищевых производств

чески нерастворимые в воде и органических растворителях природные или синтетические материалы. Иониты представляют собой мелкозернистые гранулированные частицы шарообразной формы. Ионообменные свойства ионитов характеризуются емкостью обмена, которая выражается числом миллиграмм-эквивалентов ионов, обмениваемых 1 г ионита.

Ионообменная технология получила широкое распространение после разработки синтетических ионитов, отличающихся большой обменной емкостью, механической прочностью, нерастворимостью в воде и агрессивных растворителях, способностью к регенерированию.

Иониты различаются по химическому составу и структуре. Однако все иониты построены по одному принципу: имеют матрицу, несущую избыточный заряд, и противоионы. Матрица ионообменных смол состоит из полимерной пространственной сетки гидрофобных углеводородных цепей. Строение матрицы обуславливает способность ионообменных смол набухать в воде и растворителях.

В матрице расположены функционально активные группы, придающие смоле ионообменные свойства. От характера активных групп зависят знаки зарядов матрицы ионита и подвижных ионов.

По знаку заряда обменивающихся проионов иониты подразделяют на катиониты и аниониты.

Катиониты имеют кислотный характер и обладают способностью обменивать положительно заряженные ионы. Катиониты содержат сульфогруппы - SO_3^- , карбоксильные группы - HCOO^- , фосфоновые группы - PO_3H_2^- , несущие отрицательный заряд.

Аниониты содержат амидогруппы - NH_3^+ , аминогруппы - NH_2^+ , несущие положительный заряд.

Иониты должны обладать механической прочностью, не растворяться в обрабатываемом продукте, не загрязнять его.

К ионитам, применяемым для очистки сахарных растворов, предъявляются, помимо указанных, следующие требования: они должны быть устойчивы в кислой и щелочной средах, не растворяться в воде и сахарных растворах, иметь размер и форму, обеспечивающую невысокое гидравлическое сопротивление прохождению раствора через слой.

Соотношения для описания равновесных свойств ионитов, характеризующих ионообменный процесс, получают методами термодинамики. При этом выделяют общие для всех ионитов признаки:



Процессы и аппараты пищевых производств

система ионит - раствор является двухфазной гетерогенной системой;

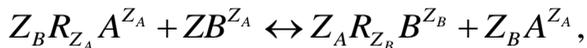
фаза ионита содержит один или несколько фиксированных ионов, несущих положительный или отрицательный заряд (заряды) ;

ионы не могут пересекать границу раздела ионит - раствор; фаза ионита содержит противоионы, которые могут пересекать границу раздела ионит - раствор;

в фазе ионита могут находиться и другие виды частиц, присутствующие в равновесном растворе, например молекулы растворителя.

Равновесие в системе ионит - раствор характеризуется коэффициентом равновесия. Величина коэффициента равновесия зависит от внешних факторов: концентрации равновесного раствора, температуры и давления.

Процесс ионного обмена в общем случае описывается простым уравнением химической реакции двойного обмена



где Z_i ($i = A, B$) — заряд обменивающегося иона i -го компонента.

В действительности этот процесс является сложным, многостадийным процессом, протекающим в гетерогенной системе твердое тело - жидкость.

Ионообменный процесс состоит последовательно из следующих стадий: диффузия сорбируемого иона через пограничный слой поверхности ионита; диффузия иона внутри ионита; химическая реакция обмена ионов в частице ионита; диффузия десорбированного иона в ионите; диффузия десорбированного иона через пограничный слой жидкости в ядро жидкой фазы.

Представленная схема позволяет выделить лимитирующую стадию ионообменного процесса и значительно упростить его математическое описание.

В общем случае кинетика ионного обмена описывается следующей системой уравнений:

$$\frac{\partial C_i}{\partial \tau} = \text{div} \left[k_i \left(1 + \frac{d \ln \gamma_i}{d \ln C_i} \right) \left(\text{grad } C_i + \frac{Z_i C_i F}{RT} \text{grad } \varphi \right) \right],$$

где C_i - текущая концентрация i -го компонента в данной фазе в шкале молярностей; τ - время; k_i - коэффициент диффузии (массопроводности) компонента в данной фазе; γ_i - коэффициент



Процессы и аппараты пищевых производств

активности; Z_i - заряд обменивающегося иона; F - постоянная Фарадея; φ - электростатический потенциал; $\rho_{эл}$ - плотность электрических зарядов; $\varepsilon_{эл}$ - диэлектрическая постоянная среды.

Для оценки самой медленной из перечисленных выше стадий процесса используют величину критерия Био ($Bi = \beta r_o / D$), в котором β — коэффициент массоотдачи в жидкой фазе; r_o — радиус частиц ионита; D (или k) — коэффициент диффузии (массопродности) в твердой фазе, по величинам которых можно судить о преимущественном влиянии той или иной стадии процесса на его общую скорость.

Так, при $Bi \leq 0,1$ скорость процесса лимитируется внешней диффузией, т. е. мал β и велик k , при $Bi \geq 30$ определяющей стадией процесса является внутренняя диффузия (велик β и мал k). При промежуточных значениях Bi процесс носит смешанно-диффузионный характер.

Для расчета коэффициента массоотдачи можно рекомендовать уравнение справедливое при $10 < Re < 100$.

$$\beta = 1,85 \frac{v}{\varepsilon} \left(\frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \right)^{0,33} Re'^{-0,66} Pr^{-0,66}$$

В этом уравнении v - скорость жидкой фазы;

$$Re' = \frac{v d_o \rho_{ж}}{(1 - \varepsilon) \mu} \quad - \text{модифицированный критерий}$$

Рейнольдса;

d_o - диаметр зерна ионита; $\rho_{ж}$ - плотность жидкой фазы; ε - порозность; μ - динамическая вязкость; Pr - критерий Прандтля.

Расчет ионообменных аппаратов производится на основе теории массообменных процессов. При расчете ионообменных аппаратов используются понятия «теоретическая ступень изменения концентраций» и «число единиц переноса».

Задача расчета заключается в определении высоты аппарата и его диаметра.

Высота аппарата определяется на основании расчета высоты эквивалентной теоретической тарелки (ВЭТТ) или высоты единицы переноса (ВЕР). Влияние основных параметров процесса описывается, как правило, с помощью критериальных уравнений, включающих усредненные во времени коэффициент массоотдачи и движущую силу процесса. Для расчета необходимо также знать вид равновесной и рабочей линий процесса.



Процессы и аппараты пищевых производств

Наибольшее распространение в промышленности получили ионообменные аппараты периодического действия с неподвижным слоем ионита. На рис. 16.3.1 показан цилиндрический аппарат, внутри которого на опорной решетке расположен стационарный слой мелкозернистого ионита. Для равномерного распределения раствора, воды и регенирующего раствора по поперечному слою ионита в аппарате имеются распределительные устройства.

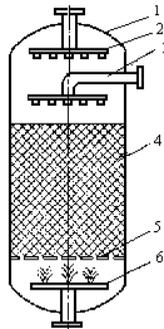


Рисунок 16.3.1 – Ионообменник со стационарным слоем ионита: 1 – корпус, 2,3,6 – распределительные устройства, 4 – слой ионита, 5 – опорная решетка

Работа ионообменников, как и адсорберов, складывается из нескольких стадий: собственно ионообмена, промывки слоя ионита от механических примесей, регенерации ионита специальным раствором и промывки от регенирующего раствора. На стадии ионообмена исходный раствор подается сверху через распределительное устройство и удаляется из аппарата снизу. Промывка ионита производится подготовленной водой противотоком. Вода подается под давлением снизу через распределительное устройство, а удаляется сверху. Регенирующий раствор поступает в аппарат и выводится через распределительные устройства. Для регенерации ионитов используются растворы солей, кислот и щелочей.

После регенерации ионитов они промываются от регенирующего раствора обессоленной водой. После промывки цикл работы повторяется.

Технологическая схема установки для очистки сахарных сиропов (рис. 16.3.2) состоит из двух вертикальных ионообменных аппаратов, установленных последовательно, в которые за-



Процессы и аппараты пищевых производств

грузен анионит марки АВ-16Г. Высота слоя анионита составляет 2,5 м.

Работа ионообменных аппаратов состоит из последовательных операций: фильтрование сиропа сверху вниз через слой ионита (рабочий цикл); вытеснение сиропа из слоя ионита конденсатом по окончании цикла фильтрования (высолаживание); интенсивная промывка (взрыхление) ионита в аппарате потоком воды снизу вверх; регенерация ионита путем прохождения через ионит сверху вниз регенерирующих растворов (NaOH, NH₄OH); промывка ионита водой сверху вниз с целью вытеснения остатков регенерирующих растворов.

Общий расход ионитов для обесцвечивания рафинадных и продуктовых сиропов составляет 0,015% к массе рафинада.

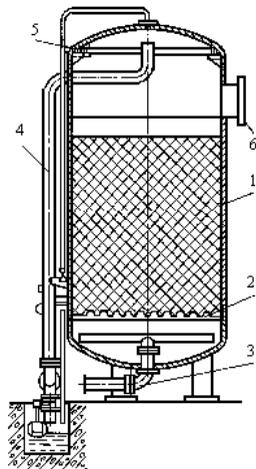


Рисунок 16.3.2 – Ионообменный аппарат для очистки сахарных сиропов: 1 – корпус, 2 – туннельный колпачок, 3 – труба для отвода промывной жидкости, 4 – труба для подачи регенерирующих растворов, 5 – радиальная труба, 6 – люк

Контрольные вопросы и задания:

- 1) В чем сущность процесса адсорбции? Какими механизмами взаимодействия между молекулами адсорбтива и адсорбента сопровождается адсорбция
- 2) Какие адсорбенты применяют в пищевой промышленности? Назовите области их применения.



Процессы и аппараты пищевых производств

- 3) Какие конструкции адсорбентов применяют для очистки газовых выбросов?
- 4) Какие конструкции адсорбентов применяют для очистки растворов в пищевой промышленности?
- 5) В чем принципиальная разница механизма ионного обмена и адсорбции?



ЛЕКЦИЯ №17

МЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ.

ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

17.1 Измельчение и классификация твердых материалов.

Общие сведения

Измельчение, классификация и прессование материалов являются механическими процессами, приводящими лишь к изменению формы материала без изменения физико-химических характеристик.

Измельчением называется процесс увеличения поверхности твердых материалов путем их раздавливания, раскалывания, истирания и удара.

Измельчение в пищевой промышленности применяется для увеличения поверхности твердых материалов с целью повышения скорости биохимических и диффузионных процессов при переработке фруктов, овощей и т. д., а также в процессах переработки пищевых отходов.

Измельчение широко применяется в мясном, свеклосахарном, спиртовом, пивоваренном, консервном и других производствах.

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

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

На измельчающих машинах можно проводить различные процессы измельчения, начиная от измельчения глыб и кончая коллоидным измельчением, позволяющим получать размеры частиц до 0,1 мкм.

Классификацией называется процесс разделения однородного сыпучего материала по величине его частиц. По технологическим требованиям часто требуется направлять на переработку куски (частицы) материалов, размеры которых должны находиться в строго определенных пределах



Процессы и аппараты пищевых производств

Процесс измельчения характеризуется степенью измельчения, т. е. отношением среднего размера куска материала до измельчения d_n к среднему размеру куска после измельчения d_k .

Обычно куски измельчаемого материала и куски или частицы, получаемые в результате измельчения, не имеют правильной формы. На практике размеры кусков (d_n и d_k) характеризуются размером отверстий сит, через которые просеивают сыпучий материал до и после измельчения.

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

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

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

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 резко снижается образование пыли и упрощается выгрузка готового продукта.

17.2 Физические основы измельчения

Измельчение материалов производится раздавливанием, раскалыванием, ударом и истиранием.

При измельчении обычно имеют место несколько сопутствующих видов измельчения. Например, истирание сопровождается раздавливанием, раскалыванием, измельчением за счет ударов.

При истирании материалов образуется большое количество пыли и в ряде случаев имеет место переизмельчение, что иногда недопустимо.

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

Прочные и хрупкие материалы измельчаются раздавливанием и ударом, прочные и вязкие - раздавливанием, вязкие материалы средней прочности - истиранием, ударом и раска-



Процессы и аппараты пищевых производств

лыванием.

Измельчение может проводиться в один или несколько приемов, в открытых или замкнутых циклах.

При измельчении в открытом цикле куски материала проходят через измельчающую машину один раз. Если в исходном материале имеется примесь мелочи, то ее предварительно отсеивают. В открытом цикле, как правило, проводят крупное и среднее дробление.

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

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

Поверхностная теория исходит из того, что при измельчении работа расходуется на преодоление сил молекулярного притяжения по поверхностям разрушения материала. Из этой теории следует, что работа, необходимая для измельчения, пропорциональна вновь образующейся поверхности измельчаемого материала. Объемная теория исходит из того, что при измельчении работа расходуется на деформации материала до достижения предельной разрушающей деформации. Отсюда следует, что работа, необходимая для измельчения, пропорциональна уменьшению объема кусков материала перед их разрушением. Полная работа внешних сил выражается уравнением Ребиндера:

$$A = A_0 + A_n = K_1 \Delta V + K_2 \Delta F, \quad (17.2.1)$$

где A_d - работа, затрачиваемая на деформацию объема разрушаемого куска, Дж; A_g - работа, затрачиваемая на образование новой поверхности, Дж; K_1 - коэффициент пропорциональности, равный работе деформирования единицы объема тела; ΔV - изменение объема разрушаемого тела; K_2 - коэффициент пропорциональности, равный работе, затрачиваемой на образование единицы новой поверхности; ΔF - приращение вновь образованной поверхности.

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



$$A_0 = \frac{\sigma^2 \Delta V}{2E}, \quad (17.2.2)$$

где ΔV - уменьшение объема кусков материала в результате их деформации перед разрушением, м^3 ; E - модуль упругости материала, Н/м^2 ; σ - разрушающее напряжение сжатия, Н/м .

Как видно из уравнения (17.2.2), работа, затрачиваемая на разрушение материала, зависит от разрушающего напряжения и модуля упругости материала.

С учетом (17.2.2) получим

$$A = \sigma^2 \Delta V / 2E + K_2 \Delta F$$

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

где D^3 — характерный размер куска.

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

Уравнение выражает гипотезу Кика - Кирпичева: работа дробления пропорциональна объему дробимого куска.

Для дробления с большой степенью измельчения можно пренебречь работой, затрачиваемой на деформирование объема куска. Тогда, учитывая, что $\Delta F \sim D^3$,

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

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

В случае, когда нельзя пренебречь слагаемыми в уравнении (17.2.1), получают уравнение

$$A = K_3 \sqrt{D^3 D^2} = K_3 D^{2.5},$$

которое носит название уравнения Бонда: работа дробления пропорциональна среднегеометрическому из его объема и поверхности.

Работа, затрачиваемая на резание (резание состоит из двух последовательных стадий: сначала лезвие ножа сжимает материал, а затем перерезает его), может быть выражена формулой акад. В. П. Горячкина

$$A_{\text{полн.}} = A_{\text{сж}} + A_{\text{п}}$$

где $A_{\text{сж}}$ - работа, затрачиваемая на сжатие продукта; $A_{\text{п}}$ -



Процессы и аппараты пищевых производств

полезная работа резания, Дж.

Работа сжатия

$$A_{сж} = \mathcal{E}h_{сж}/h,$$

где \mathcal{E} - условный модуль сжатия материала лезвием ножа, Дж; $h_{сж}$ - высота сжатого слоя, м; h - первоначальная высота слоя материала, м.

Полезная работа

$$A_{п} = F_{рез} (h - h_{сж}),$$

где $F_{рез}$ - усилие резания.

Обычно пользуются понятием удельное усилие резания, которое представляет собой усилие, отнесенное к 1 м длины лезвия ножа. Так, например, для моркови удельное усилие резания составляет 1400 - 1600 Н/м, а для картофеля – 600 - 700 Н/м.

Условный модуль сжатия материала лезвием ножа определяется экспериментальным путем. Его величина зависит от свойств материала, вида ножа, усилия и других факторов.

Лезвие режущего инструмента характеризуется режущей способностью, которая в процессе эксплуатации лезвия уменьшается.

В пищевой промышленности применяются режущие инструменты самых разнообразных форм: прямоугольные, дисковые, ленточные, серповидные и др. Режущие инструменты могут совершать вращательное, возвратно - поступательное, колебательное движение, но могут быть и неподвижными, в то время как изрезаемый материал находится в движении в машине.

17.3 Конструкция и работа основных типов измельчающих машин

Все измельчающие машины делятся на дробилки и мельницы. Дробилки применяются для крупного и среднего дробления, мельницы - для среднего, мелкого, тонкого и коллоидного измельчения.

Основные измельчающие машины подразделяются на следующие типы: щековые дробилки, гирационные, молотковые и дробилки ударного действия; протирочные машины; валковые мельницы и бегуны, шаровые и стержневые мельницы, кольцевые, вибрационные, коллоидные мельницы.

Резательные машины бывают пластинчатыми, дисковыми, роторными, струнными и др.

Ко всем измельчающим машинам предъявляются общие требования: равномерность кусков измельченного материала;

Процессы и аппараты пищевых производств

удаление измельченных кусков из рабочего пространства; сведение к минимуму пылеобразования; непрерывная и автоматическая разгрузка; возможность регулирования степени измельчения; возможность легкой смены быстро изнашивающихся частей; небольшой расход энергии на единицу продукции.

Щековые дробилки измельчают материал путем раздавливания и раскалывания в конической камере, образованной неподвижной и подвижной плитами, которые периодически сближаются. Раздавленный материал выпадает из дробилки во время обратного хода подвижной плиты. Конструкция дробилки показана на рис. 17.3.1. Щеки дробилки снабжены съемными ребристыми плитами из износостойкой стали. Подвижная щека установлена на неподвижной оси и приводится в колебательное движение от эксцентрикового вала при помощи шатуна, шарнирно связанного рычагами с этой щекой и регулировочными клиньями. Перемещением клиньев при помощи болтов регулируют ширину выпускной щели и, следовательно, степень измельчения материала. С помощью тяги и пружины обеспечивается обратное движение щеки. Коленчатый рычаг, образуемый шатуном и распорными плитами, является основой конструкции дробилки и позволяет получать очень большие давления.

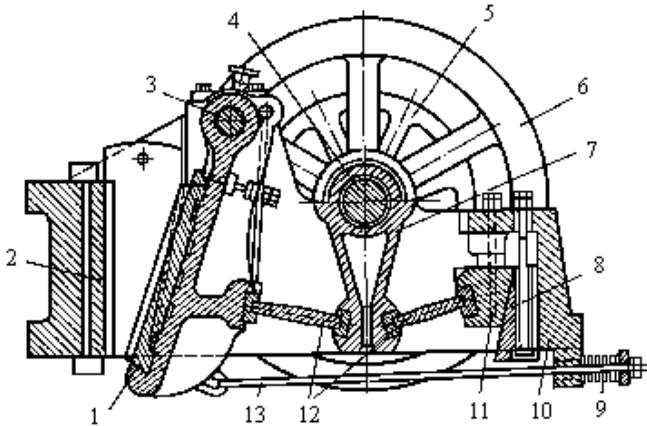


Рисунок 17.3.1 – Щековая дробилка: 1 – подвижная щека, 2 – неподвижная щека, 3 – ось подвижной щеки, 4 – эксцентрик, 5 – шкив, 6 – маховик, 7 – шатун, 8, 11 – регулировочные клинья, 9 – пружина, 12 – рычаг, 13 – тяга

Щековая дробилка проста и надежна в работе, однако



Процессы и аппараты пищевых производств

наличие в ней неуравновешенных качающихся масс требует установки ее на тяжелых фундаментах. Работа дробилки сопровождается сильным пылеобразованием и шумом, а процесс дробления - образованием мелочи.

Основными параметрами работы щековых дробилок являются угол между щеками, называемый углом захвата; частота вращения вала; производительность и расход энергии.

От величины угла захвата ст зависит степень измельчения, которая возрастает с его увеличением. Для того чтобы куски материала, поступающие в дробилку, не выталкивались из камеры измельчения, должно соблюдаться условие $\alpha < 2\varphi$, где φ - угол трения материала. Обычно угол захвата принимается в пределах $15 - 22^\circ$.

Продолжительность отхода подвижной щеки из крайнего левого положения в крайнее правое при n оборотах $\tau = 30/n$. За это время материал в камере дробилки пройдет путь $S = g\tau^2 / 2 = (g/2) (30/n)^2 = 450 g/n^2$.

Если ход щеки l см, то высота материала в камере дробилки $h = l/tg\alpha$.

Выгрузка материала под действием силы тяжести будет происходить при условии $l/tg\alpha \leq 450g/n^2$.

Число двойных качаний щеки n (в мин⁻¹)

$$n \leq \sqrt{\frac{450g \cdot tg \alpha}{l}},$$

Производительность дробилки (в т/ч) при $\alpha=22^\circ$ определяется по формуле

$$Q = 0,15 \mu d_{cp} l b n \rho_{\min},$$

где μ - коэффициент разрыхления измельченного материала ($\mu = 0,2 - 0,65$; обычно $0,3$); d_{cp} - средний размер кусков измельченного материала, см; l - длина хода щеки, см; b - длина выпускной щели, см; n - число двойных качаний в 1 мин; ρ - плотность материала, кг/см³.

Расход энергии принимается равным 400 - 1500 Вт на 1 т/ч производительности дробилки.

Валковые мельницы служат для среднего, мелкого и тонкого измельчения. Они применяются в пищевой промышленности для дробления и помола зерна, солода, плодов, жмыха и т. д. Рабочими органами валковой мельницы являются горизонтальные валки. Дробилка может иметь один валок, вращающийся вокруг горизонтальной оси параллельно неподвижной рабочей щеке,



Процессы и аппараты пищевых производств

либо два валка. В первом случае раздавливание материала происходит между неподвижной щекой и вращающимся валком. Парные валки вращаются навстречу один другому, и раздавливание происходит между валками. Поверхность валков может быть гладкой, рифленой и зубчатой.

На рис. 17.3.2 представлена схема валковой мельницы. Подшипники валка 5 неподвижны, а валка 3 - подвижны и удерживаются при помощи пружины, что позволяет валку 3 смещаться при попадании в мельницу твердых инородных тел. Размер кусков продукта определяется шириной щели между валками. Загрузка мельницы производится непосредственно из бункера.

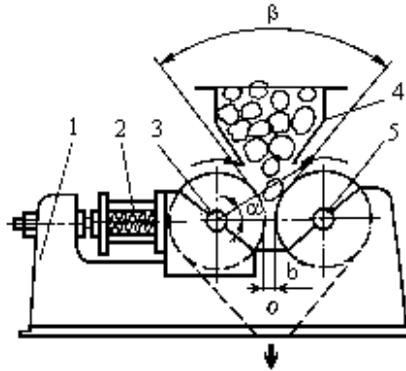


Рисунок 17.3.2 – Валковая мельница: 1 – станина, 2 – пружина, 3 – подвижный валок, 4 – бункер, 5 – неподвижный валок

При вращении валков куски материала захватываются валками и раздавливаются. Для того чтобы кусок был захвачен валками и раздавливался, необходимо, чтобы угол захвата был меньше угла трения материала φ ($\alpha \leq \varphi$)

Учитывая, что угол $\beta = 2\alpha$, дроблению материала удовлетворяет условие $\beta = 2\varphi$.

В валковых дробилках угол захвата α обычно составляет 18° . Наибольший размер измельченных кусков в 20 - 25 раз меньше диаметра валков.

Предельную частоту вращения валков (в мин^{-1}) находят, исходя из условия исключения проскальзывания кусков материала по поверхности валков, по формуле:



$$n = 616 \sqrt{\frac{f}{g \rho_{\text{мг}} d_n D}},$$

где f - коэффициент трения материала о валок ($f = 0,3$); $\rho_{\text{ТВ}}$ - плотность материала, кг/м^3 ; d_n - размер кусков исходного материала, м; D - диаметр валка, м.

Окружная скорость валков колеблется в пределах от 3 до 6 м/с.

Теоретическая производительность (в т/ч) валковых мельниц определяется по формуле:

$$Q = 0,2 \mu \rho_{\text{мг}} L D e,$$

где μ - коэффициент разрыхления измельчаемого материала ($\mu = 0,2 - 0,3$); L - длина валка, м; D - диаметр, м; e - половина зазора между валками, м.

Шаровая мельница (рис. 17.3.3) загружается шарами и материалом одновременно. Шары изготавливают из стали, диабазы, фарфора и других твердых материалов. Размер шаров зависит от размеров измельчаемого материала. Стальные шары имеют диаметр 35 - 175 мм. Корпус мельницы заполняют шарами на 30 - 35 % его объема.

Наряду с шарами используются также цилиндрические стержни. Оси стержней располагают параллельно оси корпуса мельницы. В шаровых мельницах измельчение материала происходит под действием ударов падающих шаров или стержней и путем истирания его между шарами или стержнями и внутренней поверхностью корпуса мельницы.

При вращении шаровой мельницы вследствие трения между стенкой мельницы и шарами последние поднимаются в направлении вращения на такую высоту, пока угол подъема не превысит угла их естественного откоса, после чего скатываются вниз.

С увеличением скорости вращения мельницы возрастает центробежная сила и соответственно увеличивается угол подъема шаров до тех пор, пока составляющая силы веса шаров не станет больше центробежной силы. При нарушении этого условия шары падают, описывая при падении некоторую параболическую кривую. При дальнейшем увеличении скорости вращения мельницы центробежная сила может стать настолько большой, что шары будут вращаться вместе с мельницей.



Процессы и аппараты пищевых производств

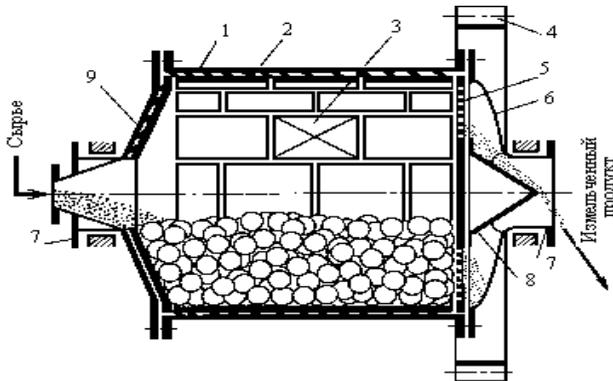


Рисунок 17.3.3 – Шаровая мельница: 1 – корпус барабана, 2 – броневая плита, 3 – люк, 4 – приводная шестерня, 5 – решетка, 6 – крышка, 7 – полые цапфы, 8 – направляющий конус, 9 – крышка

Обычно частоту вращения мельницы принимают равной 75% от $n_{пр}$ и вычисляют по формуле:

где D - диаметр барабана, м.

$$n = \frac{32}{\sqrt{D}}.$$

Производительность мельниц Q (в т/ч) рассчитывается из условия выхода измельченных частиц заданного размера и определяется по приближенной формуле:

$$Q = VKD^{0,6},$$

где V - объем барабана, m^3 K - коэффициент пропорциональности, зависящий от среднего размера кусков исходного материала; $K = 0,41 - 1,31$ и возрастает с увеличением среднего размера частиц измельченного материала.

В *кольцевых мельницах* измельчение происходит путем раздавливания и истирания материала роликами или шарами, катящимися по внутренней поверхности кольца. Ролики или шары прижимаются к поверхности кольца центробежной силой или пружинами. В зависимости от этого различают центробежные и пружинные мельницы.

Вибрационные мельницы предназначены для тонкого из-



Процессы и аппараты пищевых производств

мельчения материала. Мельница представляет собой барабан, заполненный примерно на 70 % измельчающими телами, например шарами. Внутри барабана установлен вибратор, который сообщает вибрацию шарам и измельчаемому материалу. Интенсивность работы такой мельницы зависит от частоты и амплитуды колебаний. Как правило, частота колебаний составляет 1500 - 2500 мин⁻¹ при амплитуде 2 - 4 мм.

Коллоидные мельницы используются для очень тонкого измельчения суспензий. Измельчение проводится мокрым способом. Основными частями коллоидной мельницы являются корпус с коническим гнездом и ротор. Между конической поверхностью корпуса и поверхностью ротора имеется зазор, равный долям миллиметра. Ротор вращается с окружной скоростью 30 - 120 м/с. В зазоре между корпусом и ротором твердые частицы суспензии измельчаются истиранием.

Рамная центробежная свеклорезка служит для изрезывания свеклы в стружку для извлечения из нее сахарозы.

Принцип действия свеклорезки заключается в следующем. Свекла загружается в свеклорезку через загрузочный бункер, увлекается вращающейся улиткой и под действием центробежной силы прижимается к режущей кромке ножей, которыми изрезывается в стружку. Свекловичная стружка через проемы ножевых рам выпадает в пространство между корпусом свеклорезки и кожухом и затем через люк поступает на дальнейшую переработку.

Для замены ножей ножевая рама поднимается и заменяется глухой рамой без ножей. Для очистки ножей применяется продувка паром или сжатым воздухом.

Вертикальные овощерезки применяются для разрезания овощей на ломтики, кубики, соломку и т. д. Овощерезка состоит из загрузочной воронки, измельчающей камеры и привода. Режущим инструментом является горизонтальный диск, насаженный на вертикальный вал, приводимый во вращение электродвигателем. Машина изготовлена из высококачественного цветного металла, покрытого слоем полиамида.

Размеры и форма нарезанных овощей изменяются в зависимости от конфигурации ножей.

На рис. 17.3.4 показаны некоторые конструкции режущих дисков.

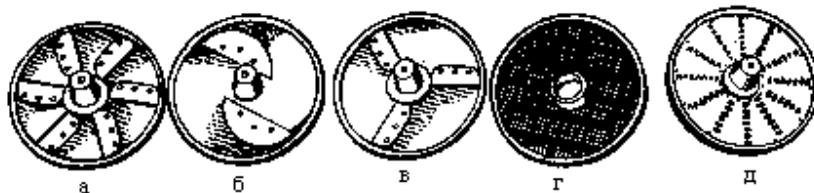


Рисунок 17.3.4 – Режущие диски для овощерезки: а – стандартный ломтерезный, б – тонкий для мягких и сочных продуктов, в – для нарезания волнистых ломтиков, г – для нарезания кубиков, д - терка

17.4 Классификация зернистых материалов

Для разделения смеси зернистых материалов на фракции с узкими пределами размеров частиц применяются три вида классификаций.

Механическая, которая заключается в рассеиве сыпучих материалов на ситах, решетках или других устройствах. При механической классификации через отверстия рассеивающего устройства проходят частицы материала, размеры которых меньше размеров отверстий. Не прошедшие через сита куски или частицы направляются на дополнительное измельчение.

Гидравлическая классификация - разделение смеси твердых частиц на фракции в зависимости от скорости оседания частиц в жидкости.

Воздушная сепарация - разделение смеси твердых частиц на фракции в зависимости от скорости отстаивания частиц в воздухе.

Классификация применяется как вспомогательная операция для удаления мелочи перед измельчением материала, а также при возврате крупных частиц материала на повторное измельчение и в качестве самостоятельной операции - для выделения готового продукта заданного фракционного состава.

Механическая классификация, которая также называется грохочением, применяется для разделения частиц размерами от нескольких сантиметров до долей миллиметра. Классификацию проводят на рассеивающих устройствах, называемых грохотами или сепараторами. Для рассеивания материалов применяют металлические или другие сита, решета из металлических ли-



Процессы и аппараты пищевых производств

стов со штампованными отверстиями, решетки из параллельных стержней - колосников.

Сита бывают с квадратными или прямоугольными отверстиями, имеющими размеры от 0,04 до 100 мм. Сита обозначаются номерами, соответствующими размеру стороны отверстия сита в свету, выраженному в миллиметрах или микронах.

Решета изготовляют из металлических листов толщиной 2 - 12 мм, в которых штампуют круглые или прямоугольные отверстия размером 2 - 10 мм. Чтобы избежать забивки отверстий материалом, их выполняют в форме конуса, расширяющегося книзу.

Колосники собирают из стержней обычно трапецеидального сечения. При такой форме колосников облегчается проход частиц материала через расширяющиеся книзу зазоры между колосниками.

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

В результате классификации получают два продукта: отсев и отход. Отсев - частицы, прошедшие через рассеивающее устройство, отход - куски (частицы), не прошедшие через рассеивающее устройство.

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

В промышленности используются грохоты с неподвижными и подвижными решетками. Наибольшее применение нашли грохоты с неподвижными решетками. Грохоты бывают качающиеся, барабанные, вибрационные, дисковые, роликовые, колосниковые и цепные.

На рис. 17.4.1 показан качающийся грохот, который широко применяется в промышленности.

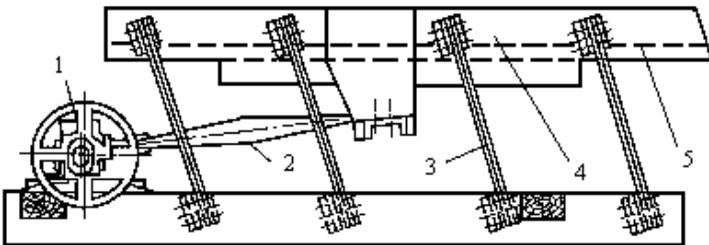


Рисунок 17.4.1 – Качающийся грохот: 1 – эксцентрик, 2 – шатун, 3 – пружина, 5 - сито



Грохот приводится в колебательное движение с помощью кривошипного механизма. Отсев проваливается при сотрясении сита в отверстия, а отход перемещается вдоль сита и с него поступает непосредственно на измельчение. Для отбора нескольких фракций качающиеся грохоты делают многоярусными; в этих грохотах материал подается на верхнее сито, имеющее наибольшие отверстия. Крупные куски удаляются с этого сита как отход, а отсев поступает на расположенное ниже сито с более мелкими отверстиями. На этом сите снова получают отход и отсев, причем отсев попадает на следующее более мелкое сито, и т. д.

Достоинствами плоских качающихся грохотов являются большая производительность, высокая эффективность грохочения, компактность, удобство обслуживания и ремонта.

Недостатком этих грохотов является неуравновешенность конструкции, в результате чего работа их сопровождается сотрясениями и толчками.

Барабанный грохот представляет собой барабан, установленный наклонно под углом $4 - 7^\circ$ к горизонту. Барабан изготавливается из сетки или перфорированных стальных листов и вращается на центральном валу либо на выносных опорных роликах. Материал загружается с открытого торца барабана. Отсев проваливается через перфорированные стенки барабана, а отход выходит с противоположного открытого торца барабана.

Для очистки зерна, зерновых, крупяных и бобовых культур от сорных и зерновых примесей используются горизонтальные или вертикальные цилиндрические зерноочистительные сепараторы. Разделение в таких сепараторах происходит на металлическом сите. Проходные размеры отверстий сита увеличиваются по ходу движения зерновой смеси. Разделение смеси происходит за счет центробежной силы в вертикальных сепараторах либо за счет вибрационных колебаний материала и сита в горизонтальных сепараторах.

На рис. 17.4.2 схематично показан барабан центробежного сепаратора. Барабан состоит из нескольких секций. Зерно с примесями поступает в верхнюю секцию. За счет центробежной силы зерно вместе с примесями отбрасывается к перфорированной стенке барабана сепаратора. Примеси, имеющие меньшие размеры, чем зерно, проходят через отверстия стенки и удаляются из сепаратора в виде отсева, а зерно поступает в нижнюю секцию. Стенки барабана этой секции имеют отверстия большего диаметра, через которые зерно проходит и удаляется из сепаратора.

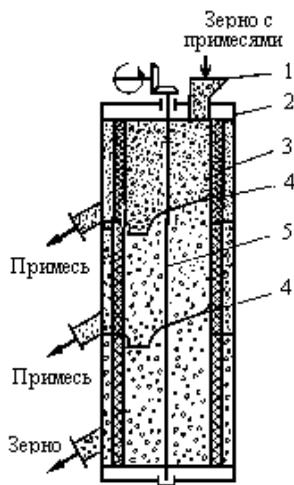


Рисунок 17.4.2 – Барабанный сепаратор: 1 – воронка, 2 – корпус, 3 – барабан, 4 – перегородка с каналом, 5 - вал

В вибрационных сепараторах плоское наклонное сито совершает колебания с помощью вибратора. При вибрации материала на сите происходит его разделение, причем отверстия сит не забиваются материалом, даже если разделяются влажные материалы. Сепаратор легко регулируется за счет изменения частоты и амплитуды вибраций, сита легко сменяются.

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

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

На рис. 17.4.3 показана схема центробежного сепара-



Процессы и аппараты пищевых производств

тора. Обычно такой сепаратор устанавливается на линии отходящего воздушного потока от мельницы. Отделение крупных частиц происходит в кольцевом канале и конусе, где частицы за счет центробежной силы отбрасываются на стенки конуса. Крупные частицы соскальзывают со стенок конуса и выгружаются через патрубки 4 и 5. Воздух вместе с мелкими не отделившимися частицами удаляется через патрубок в циклон.

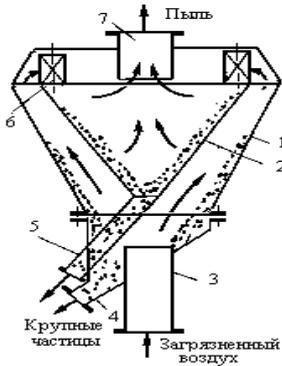


Рисунок 17.4.3 – Схема центробежного сепаратора: 1 – корпус, 2 – внутренний конус, 3 – патрубок для ввода исходного продукта, 4, 5 – патрубки для отвода крупных частиц, 6 – направляющая лопатка, 7 – патрубок для вывода пыли

Контрольные вопросы и задания:

- 1) С какой целью применяют измельчение и классификацию твердых материалов?
- 2) Какими методами производится измельчение твердых материалов?
- 3) От каких характеристик измельчаемых материалов зависит работа, затрачиваемая на измельчение?
- 4) Какие типы измельчающих машин применяют в промышленности? Перечислите характеристики дробилок и мельниц.
- 5) Каков принцип действия щековых дробилок?
- 6) Какие мельницы применяют для дробления и помола зерна?
- 7) Какие виды классификации используются в промышленности?
- 8) На чем основана классификация материалов грохочением?
- 9) На чем основана гидравлическая и воздушная классификация?



ЛЕКЦИЯ №18

МЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ. ПРЕССОВАНИЕ

18.1 Обезвоживание и брикетирование

Для обезвоживания, брикетирования твердых материалов, гранулирования и формования пластичных материалов в пищевой промышленности применяется прессование. Прессование заключается в том, что обрабатываемый материал подвергается внешнему давлению в специальных прессах.

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

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

Брикетирование применяется для получения брикетов, т. е. брусков прямоугольной или цилиндрической формы спрессованного материала, в сахарном производстве для получения брикетов свекловичного жома и сахара-рафинада, в производстве пищевых концентратов и лекарственных препаратов, в кондитерском и в комбикормовом производствах, в процессах утилизации отходов.

Разновидностью брикетирования являются *таблетирование* и *гранулирование*. Таблетки и гранулы имеют меньшие размеры по сравнению с брикетами. Промышленностью выпускаются гранулированный чай, кофе, пищевые концентраты, конфеты и другие продукты.

Формование пластичных материалов используется в хлебопекарном, кондитерском и макаронном производствах для придания изделию из теста заданной формы.

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

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



центрифугах.

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

Жом, предназначенный для скармливания скоту, отжимается на прессах до содержания 9 - 10%. Прессованный жом получают в виде брикетов круглого сечения диаметром от 12 до 20 мм или прямоугольного сечения высотой от 20 до 40 мм. Плотность спрессованного жома составляет около 750 кг/м³. Степень отжатия воды зависит от давления прессования. Однако большая степень отжатия воды приводит к уменьшению производительности пресса и увеличению удельного расхода энергии.

В сахарорафинадном производстве прессы применяются для получения брусков сахара-рафинада. При прессовании каши происходит значительное сокращение объема промежутков между кристаллами за счет перемещения кристаллов относительно друг друга, а также заполнение промежутков осколками раздробленных кристаллов. При прессовании создаются благоприятные условия для срачивания кристаллов в брикетах при их сушке.

Брикетиrowание проводят в специальных прессах до плотности, при которой брикет не может самопроизвольно разрушиться. После прессования брикеты жома подвергают охлаждению, а сахар - высушиванию.

Основной характеристикой процесса брикетиrowания является зависимость между приращением давления прессования Δp и уменьшением коэффициента уплотнения прессуемого вещества

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

где V и V_1 - объем продукта до и после прессования; h и h_1 - высота брикета до и после прессования.

Для вывода уравнения распределения давления прессования по высоте брикета рассмотрим схему сил, действующих на элементарный слой брикета (рис. 18.1.1).

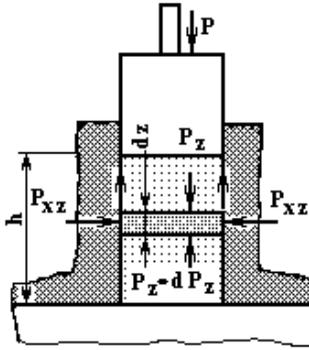


Рисунок 18.1.1 – Схема сил, действующих на элементарный слой брикета

Давление прессования складывается из давления на уплотнение продукта и давления для преодоления сил трения продукта о пресс-форму. Пренебрегая трением продукта о пресс-форму и принимая, что продукт является однородным, С. М. Гребенюком получено выражение для описания процесса прессования:

$$\psi \ln \frac{P}{P_0} = \beta - \beta_0$$

где ψ - модуль прессуемости; p, p_0 - соответственно конечное и начальное давления сжатия; β, β_0 - конечный и начальный коэффициенты уплотнения.

$$p_z = p \exp\left(-\frac{\xi f \Pi z}{F}\right)$$

В условиях равновесия на элемент брикета, находящийся в матрице на расстоянии z от пуансона, в вертикальной плоскости действуют нормальные силы p_z и $p_z - dp_z$, удельные силы трения T_z и силы от боковых давлений p_{xz} .

Удельная сила трения $T_r = f p_{xz}$, где f — коэффициент трения материала о стенку матрицы.

Вертикальное удельное давление связано с боковым удельным давлением p_{xz} соотношением $p_{xz}/p_r = \xi$. Если поперечное сечение F и периметр брикета Π , то условие равновесия сил на ось z выражается уравнением $F dp_z = f p_z \Pi dz$. Учитывая, что приращение давления и силы трения равны, но противоположны по направлению, получим $F dp_z = - f \xi p_z \Pi dz$. Проинтегрировав это



Процессы и аппараты пищевых производств

уравнение в пределах от p до p_r и от 0 до z при постоянстве величин f и ξ_r получим

$$p_z = p \exp\left(-\frac{\xi f \Pi_z}{F}\right) \quad (18.1.1)$$

Уравнение (18.1.1) представляет собой уравнение распределения давления прессования по высоте сжатого брикета. Его можно также использовать для определения потерь давления на трение о стенки матрицы.

Уменьшение коэффициента уплотнения элементарного слоя, перпендикулярного направлению усилия прессования, связано с приращением давления в этом слое. Если принять, что первоначальная плотность брикета по всей высоте постоянна, то подставляя значение p_z из уравнения (18.1.1), найдем

$$\beta_0 - \beta_z = \psi \ln \frac{p_z}{p_0}$$

откуда

$$\beta_z = \beta_0 - \psi \ln p + \psi \ln p_0 + \psi \xi f \Pi_z / F$$

Средний коэффициент уплотнения

$$\beta = \beta_0 - \psi \ln \frac{p}{p_0} + \psi \xi f \Pi_z / 2F$$

(18.1.2)

Средняя плотность брикета постоянного сечения

$$\rho = (\rho - \rho_k \psi \ln p / p_0) / [1 - \psi \xi f \Pi G_k / (2F^2 \rho_k)]$$

(18.1.3)

где G_k - масса твердой фазы в брикете.

Конечный и начальный коэффициенты уплотнения в этом случае $\beta = \rho / \rho_k$ и $\beta_0 = \rho_0 / \rho_{k0}$; конечная высота брикета $h_r = G_k / F \rho_{k0}$; ρ_{k0} - соответственно начальная и конечная плотности брикета.

Уравнения (18.1.2) и (18.1.3) являются основными уравнениями процесса одностороннего прессования дисперсного вещества, полученными при допущении постоянства коэффициента трения f и коэффициента бокового давления ξ .

При одностороннем прессовании вследствие трения продукта о стенки матрицы плотность брикета оказывается неравномерной по высоте. Брикет более высокого качества получают при двустороннем прессовании. В этом случае брикет имеет более равномерную плотность по высоте, что улучшает его качество.



18. 2 Гранулирование и формование

Гранулирование и формование проводят в экструдерах для получения полуфабрикатов или готовых изделий в результате комплексного воздействия давления, температуры, влажности и напряжения сдвига. Преимущества экструзии состоят в совмещении в одном аппарате нескольких процессов: диспергирования, перемешивания, гомогенизации, термической обработки (охлаждения), формования и сушки пищевых материалов. Экструдер заменяет ряд периодических процессов и оборудования, а сам процесс экструзии позволяет направленно изменять свойства и структуру перерабатываемого материала ароматизаторов, красителей, пластификаторов и вкусовых добавок. Экструзию применяют при выработке изделий из теста, таких, как макароны, сухие завтраки, кондитерские изделия, детское питание, гранулированные корма. Готовый продукт, выработанный таким образом, или полуфабрикат называют экструдатом. Форма экструдата определяется формой отверстий в матрице, которую устанавливают на выходе материала из экструдера.

Экструзия бывает холодной, тепловой и варочной. При холодной экструзии происходит только механическое формование пластического сырья в результате продавливания его через матрицу. Этот вид экструзии применяют при выработке мучных изделий, макарон, плавленых сыров, конфетных масс, мясного фарша и других продуктов. Тепловую экструзию используют для частичной клейстеризации крахмалосодержащих материалов влажностью 20...40% с последующей обжаркой или выпечкой. При варочной экструзии во время нагревания в перерабатываемом материале происходят необратимые биофизические изменения прежде всего белков, крахмала и сахара. Экструдат затем сушат или обжаривают и покрывают вкусовыми добавками. Способом варочной экструзии получают сухие завтраки, хлебцы, сухие напитки, супы, мясопродукты.

18. 3 Оборудование для обработки продуктов прессованием

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

Гидравлический пресс работает по законам гидравли-



Процессы и аппараты пищевых производств

ки. Основным узлом пресса является рабочий цилиндр, внутри которого перемещается плунжер, соединенный с подвижной плитой. Плунжер приводится в движение жидкостью высокого давления.

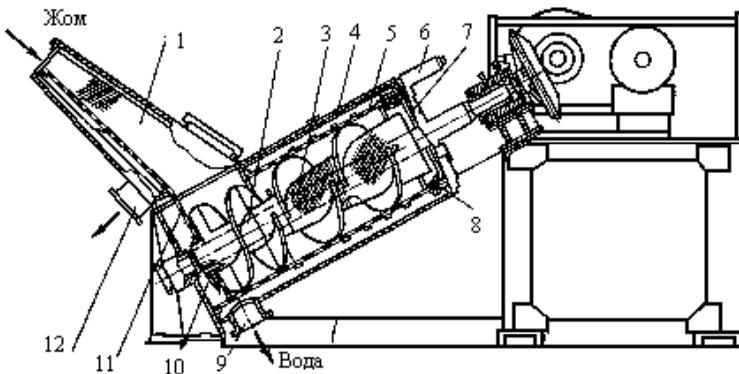
Прессуемый материал помещается между подвижной и неподвижной плитами. Сила давления, создаваемая поршнем на материал, прямо пропорциональна его площади:

$$P = pF,$$

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

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

В сахарной промышленности для обезвоживания жома применяются наклонные горизонтальные и вертикальные шнековые прессы с одно- и двусторонним отжатием. Прессы двустороннего отжатия более производительны, чем прессы с односторонним отжатием, и позволяют отжимать жом до более низкой конечной влажности.



Наклонный шнековый пресс (рис.18.3.1) предназначен для отжатия жома.

Рисунок 18.3.1 – Наклонный шнековый пресс: 1 – сепаратор, 2 – вал шнека, 3 – сито, 4 – отжимной шнек, 5 – цилиндрическое сито, 6 – регулировочное приспособление, 7 – отверстие для выгрузки жома, 8 – коническое сито, 9 – штуцер, 10 – отверстия для удаления воды, 11- дополнительная поверхность фильтрования, 12 – штуцер для отвода воды



Жом поступает в сепаратор, где из него частично удаляется вода, а затем в пресс, где отжимается основная часть воды. Часть отжатой воды проходит через цилиндрическое сито и удаляется через штуцер, другая часть воды проходит через сито в полую часть вала шнека и удаляется через отверстие и штуцер. Выгрузка отжатого жома производится через кольцевые отверстия между коническим ситом и корпусом отжимного шнека. Размер отверстия влияет на продолжительность пребывания жома в прессе и степень отжатия воды и регулируется специальным приспособлением.

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

Вертикальный шнековый пресс показан на рис. 18.3.2. Основной частью прессы является полый вертикальный шнек, установленный в специальных траверсах. На кожухе шнека с противоположных сторон расположены контролапсты, которые входят в промежутки между лопастями шнека и препятствуют вращению материала вместе со шнеком. Контролапсты имеют отверстия, через которые проходит пар, подводимый по трубопроводу.

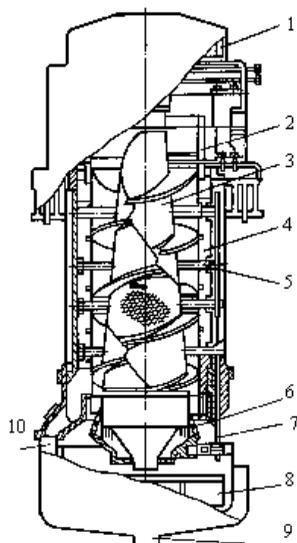


Рисунок 18.3.2 – Вертикальный шнековый пресс: 1. – приводная шестерня, 2 – загрузочная воронка, 3 – шнек, 4 – разъем-



Процессы и аппараты пищевых производств

ное сито, 5 – контрлопасть, 6 – коническое сито, 7 – болт, 8 – скребок, 9 – штуцер, 10 - канал

В верхней части пресса расположена воронка для загрузки материала, а под ней по цилиндрической образующей - цилиндрические разъемные сита с коническими отверстиями. Влажный жом на прессование поступает через воронку и верхними лопастями шнека направляется вниз, в зону с меньшим поперечным сечением, где происходит отжатие воды. Часть отпрессованной воды выходит через отверстия цилиндрического сита, а другая часть - через полый вал шнека. Выделенная вода по каналу и штуцеру удаляется из пресса.

В нижней части цилиндрического сита расположено подвижное коническое сито, которое можно поднимать и опускать при помощи болтов. Изменением размера щели между этим ситом и нижней частью цилиндрического сита регулируется степень отжатия жома.

Отжатый жом, выходящий через щель, образованную коническим и цилиндрическим ситами, при помощи скребков выгружается из шнека.

Штемпельные и ротационные прессы применяются для брикетирования сухого жома. Ротационные прессы имеют плоскую или цилиндрическую матрицу. В штемпельных прессах матрица является неподвижной, а пуансон (штемпель) совершает возвратно-поступательное движение. В таких прессах наблюдаются большие инерционные силы при прессовании, поэтому они должны устанавливаться на массивных фундаментах.

Одна из конструкций ротационного пресса с горизонтальной плоской матрицей показана на рис. 18.3.3. Основной частью пресса является прессующий узел, состоящий из матрицы и прессующих валков, устройства для среза гранул и полого вала. Матрица установлена на полом валу и вращается вместе с ним. Конический распределитель служит для направления сухого материала под валки.

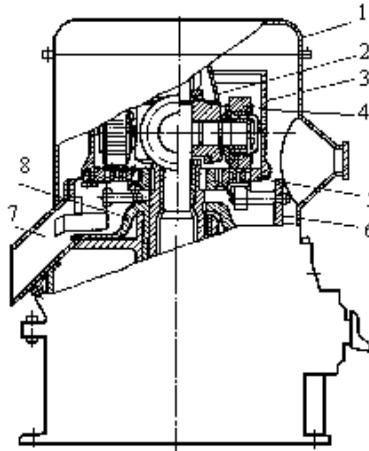


Рисунок 18.3.3 – Ротационный пресс: 1 – кожух, 2 – распределитель материала, 3 – бункер, 4 – прессующий валок, 5 – матрица, 6 – устройство для среза гранул, 7 – выгрузной лоток, 8 – лопасть

Спрессованный материал на выходе из отверстия матрицы срезается ножом и лопастью направляется в выгрузной лоток. Зазор между матрицей и лезвием ножа должен быть не более 0,5 мм. Необходимо, чтобы нож перекрывал рабочую ширину матрицы; лезвие его должно располагаться параллельно нижней плоскости матрицы. Угол наклона ножа к горизонтальной плоскости составляет 30° .

Для срезания брикета устанавливаются четыре ножа. Если необходимо получить более крупные брикеты, количество ножей уменьшают.

Дисковый пресс, используемый в производстве прессованного сахара-рафинада, состоит из следующих основных узлов: набивной коробки для приема рафинадной кашки; диска с матрицами и пуансонами; упора для прессования брусков рафинада; механизма для натирки стола; механизма для подачи сахара в матрицы; механизма для выталкивания отпрессованных брусков рафинада; механизма для подъема пуансонов; механизма для поворота диска, привода и станины.

Стол пресса совершает вращательное движение против часовой стрелки в горизонтальной плоскости (рис. 18.3.4). Во время



Процессы и аппараты пищевых производств

одного оборота стол делает четыре остано-
вки, при которых совершаются последовательно следующие опера-
ции: I—заполнение матрицы рафинадной кашкой; II — формо-
вание при движении пуансона вверх; III — выталкивание брусков
сахара пуансоном из матрицы; IV — очистка пуансона от остатков
сахара и натирка мастикой.

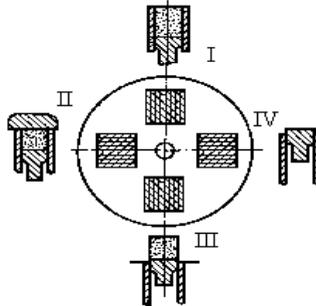


Рисунок 18.3.4 – Схема работы дискового пресса

Матрицы пресса выполнены в виде латунных коробок, ко-
торые вставлены в отверстия диска.

Из *таблетирующих машин* наибольшее распространение в
пищевой промышленности получили ротационные. В этих маши-
нах материал прессуется пуансонами, вмонтированными в ротор
по его окружности на двух уровнях. Во время работы пуансоны
перемещаются вдоль вертикальной оси благодаря копирам и
прессующим роликам, которые предназначены для их верхнего и
нижнего рядов. При вращении ротора пуансоны, двигаясь в ма-
трице, заполненной предварительно таблетлируемым материалом,
сжимают его с двух противоположных сторон. Таблетка выталки-
вается из матрицы нижним пуансоном при выведенном верхнем.

Ротационные таблетирующие машины делятся на два клас-
са. В машинах первого класса пуансоны катятся по копирам, в
машинах второго класса скользят. Различают машины однократ-
ного и многократного действия, в которых каждая пара пуансонов
за один оборот ротора формирует соответственно одну или не-
сколько таблеток.

Часовая производительность ротационной таблетирующей
машины (в кг/ч)

$$Q=60(P/p)h\rho Nmkn,$$

где P - усилие прессования, Н; p - давление прессования,
МПа; h - высота материала в матрице до прессования, м; ρ -
плотность прессуемой массы, кг/м³; N - количество матриц в ро-



Процессы и аппараты пищевых производств

торе; t - количество гнезд в матрице; k - коэффициент многопозиционности ($k=1, 2, 3, 4$); n - частота вращения ротора, мин⁻¹.

Гранулирование может осуществляться тремя способами: на специальных устройствах - грануляторах, скатыванием и в псевдооживленном слое.

Двухшнековый формовочный пресс (рис.18.3.5) используется в производстве конфет, в частности пралине, методом формования конфетной массы через фильеру с калиброванными отверстиями. Пресс создает давление в конфетной массе и продавливает ее через фильеру. Непосредственно на выходе из фильеры жгуты конфетной массы рубятся на гранулы эксцентрично установленными ножами гранулятора (рис.18.3.6), расположенными с определенным зазором у фильеры.

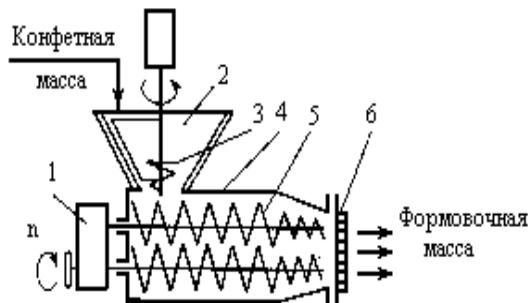


Рисунок 18.3.5 – Двухшнековый формовочный пресс: 1 – привод, 2 – загрузочный бункер, 3 - дозирующий шнек, 4 – корпус пресса, 5 – шнек, 6 - фильера

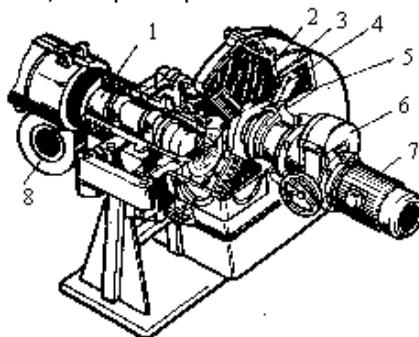


Рисунок 18.3.6 – Установка для гранулирования: 1 – подающий шнек, 2 – фильера, 3 – кожух гранулятора, 4 – рубящий нож, 5 – вал, 6 – редуктор, 7 – электродвигатель, 8 - вентилятор



Процессы и аппараты пищевых производств

Фильера представляет собой плоский металлический диск с отверстиями, через которые продавливается прессуемая масса. Форма отверстия фильеры определяет вид изделия. При продавливании через отверстия фильеры масса принимает определенную форму. Течение массы в отверстиях фильеры подобно течению очень вязкой жидкости. Давление, создаваемое шнеком, зависит от гидравлического сопротивления в отверстиях фильеры. Сопротивление определяется консистенцией теста и формой, и размером отверстий.

Рубящие ножи закреплены на вращающемся валу, имеющем собственный привод. Эксцентричное расположение ножевого крыла позволяет заполнить материалом все сечение фильеры. Для регулировки зазора между фильерой и рубящими ножами ножевой вал может перемещаться в осевом направлении. Для этого кожух гранулятора может быть отведен в сторону вместе с приводом. При демонтаже шнека грануляционная головка может быть отведена от нагнетающего шнека.

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

Дражировочный гранулятор (рис. 18.3.7) представляет собой чашеобразный корпус с вогнутым дном, который совершает сложное движение в горизонтальной плоскости. Чаша вращается вокруг собственной оси и вокруг вала привода. Такое сложное движение чаши создает восходящий винтообразный поток порошка. В результате происходит скатывание ядра оболочкой, что приводит к росту гранул. Ядром служат обычно кристаллы сахара, изюм и орехи, ягоды и т. д. Оболочка состоит из сахарной цедры, порошка какао, кофе и т.д.

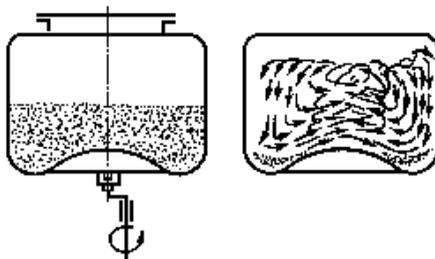


Рисунок 18.3.7 – Схема движения частиц в дражировочном грануляторе



Контрольные вопросы и задания:

- 1) Для чего применяют прессование в пищевой промышленности?
- 2) Чем различаются обезвоживание и брикетирование продуктов?
- 3) От каких величин зависит средний коэффициент уплотнения?
- 4) Какое оборудование используют при обработке продуктов прессования?
- 5) Каков принцип работы обезвоживающих шнековых прессов, ротационных брикетирующих прессов?
- 6) Какое оборудование применяют для получения экструдированных пищевых продуктов?



СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров, Ю.И. Аппараты для смешения сыпучих материалов / Ю.И. Макаров. – М.: Машиностроение, 1973. – 216с.
2. Кавецкий, Г.Д. Процессы и аппараты пищевой технологии / Г.Д. Кавецкий, В.П. Касьяненко. – М.: КолосС, 2008. - 591с.
3. Плаксин, Ю.М. Процессы и аппараты пищевых производств / Плаксин Ю.М., Н.Н. Малахов, В.А. Ларин – М.: КолосС, 2008. - 750с.