

**АВТОНОМНАЯ НЕКОММЕРЧЕСКАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛГОРОДСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ КООПЕРАЦИИ,
ЭКОНОМИКИ И ПРАВА»**

КУРСКИЙ ИНСТИТУТ КООПЕРАЦИИ (филиал)

Кафедра товароведно-технологических дисциплин

**Н.Д. Тутов
В.А. Авроров
С.Ф. Рюмшина**

ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Учебное пособие

**Для студентов направления подготовки
19.03.04 – «Технология продукции и организация общественного питания»**

Курск 2019

УДК 664.03
ББК 36.81
Т91

Т91 Тутов Н.Д., Авроров В.А., Рюмшина С.Ф. Процессы и аппараты пищевых производств. Учебное пособие для студентов направления подготовки 19.03.04 «Технология продукции и организация общественного питания»
Курск, 2019. - 293 с.

Курс лекций составлен в соответствии с требованиями по данной дисциплине Государственного образовательного стандарта по направлению подготовки 19.03.04 – «Технология продукции и организация общественного питания».

В учебном пособии рассмотрены основные процессы технологии обработки пищевого сырья и полуфабрикатов: механические, гидромеханические, тепломассообменные и мембранные процессы, а также приведена информация по аппаратурной составляющей этих процессов.

Рекомендовано кафедрой товароведно-технологических дисциплин протокол №9 от 30 апреля 2019 г.

Рецензент:

Д. б. н. наук, профессор кафедры
товароведно-технологических дисциплин
Курского института кооперации
Еременко В.И.

©Тутов Н.Д.

©Авроров В.А.

©Рюмшина С.Ф.

©Курский институт кооперации (филиал) АНО ВО «Белгородский университет кооперации, экономики и права»

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
Лекция 1. Основные сведения о процессах и аппаратах пищевых производств и методах их исследований	6
1.1. Основные сведения о процессах. Предмет и задачи курса	6
1.2. Определение выходных параметров технологических процессов.	9
1.3. Характеристики моделей процессов как объектов исследований	13
1.4. Основные принципы исследования процессов	18
1.5. Основные положения теории подобия. Метод анализа размерностей	23
Условные обозначения	35
Глоссарий	36
Контрольные вопросы	38
Лекция 2. Сущность, назначение и характеристики механических процессов обработки пищевого сырья и полуфабрикатов	39
2.1. Основные сведения о свойствах и поведении пищевых материалов при механической обработке	40
2.2. Процесс измельчения пищевого сырья. Технологическое оборудование для измельчения пищевых масс	64
2.3. Процесс сортирования сыпучих материалов и оборудование для сортирования	83
2.4. Процесс смешивания пищевых компонентов. Модели и характеристики качества перемешивания. Аппараты для смешивания	91
2.5. Обработка пищевых материалов давлением	110
2.6. Процессы транспортирования пищевых материалов	128
Условные обозначения	137
Глоссарий	138
Контрольные вопросы	141
Лекция 3. Гидромеханические процессы. Основные понятия и закономерности	142
3.1. Основные понятия гидростатики и гидродинамики	142
3.2. Понятие о вязкости и течении жидкостей	147
3.3. Основные факторы гидродинамики аппаратов	155
3.4. Анализ некоторых моделей истечения жидких продуктов	163
Условные обозначения	165
Глоссарий	166
Контрольные вопросы	167
Лекция 4. Тепловые процессы. Основные виды теплопередачи. Теплообменные аппараты	167
4.1. Основные понятия о процессах теплообмена	168
4.2. Передача теплоты теплопроводностью	172
4.3. Основные сведения о конвективном теплообмене	184
4.4. Передача теплоты излучением	195

4.5. Аппараты для нагрева и охлаждения продуктов	199
4.6. Процессы нагрева, охлаждения и конденсации	213
Условные обозначения	220
Глоссарий	221
Контрольные вопросы	223
Лекция 5. Массообменные процессы	225
5.1. Основные понятия теории массопередачи	225
5.2. Процессы адсорбции и абсорбции	230
5.3. Диффузионные аппараты	234
Лекция 6 Тепломассообменные процессы	237
6.1. Перенос теплоты и массы вещества в коллоидных капиллярно-пористых телах	237
6.2. Анализ процессов тепломассообмена при сушке пищевых материалов	248
6.3. Условия термодинамического равновесия при сушке	255
6.4. Основные характеристики пищевых материалов, как объектов сушки	265
Условные обозначения	269
Глоссарий	271
Контрольные вопросы	272
Лекция 7. Процессы разделения гетерогенных систем. Мембранные процессы	274
7.1. Основные сведения о процессах разделения гетерогенных систем. Процессы осаждения и фильтрации	274
7.2. Основные сведения о мембранных процессах	281
Условные обозначения	290
Глоссарий	290
Список использованной литературы	291

Введение

Изучение курса по процессам и аппаратам пищевых производств направлено на приобретение знаний об основных процессах технологии обработки пищевого сырья и полуфабрикатов: механических, гидромеханических, тепло- массообменных и мембранных процессах, основных положений теории и методов преобразования пищевых масс в готовую продукцию, а также на изучение аппаратурной составляющей этих процессов.

Курс «Процессы и аппараты» создавался в результате многолетних исследований, проводимых отечественными и зарубежными учеными в области пищевых и химических технологий. Основные идеи курса были высказаны еще в XIX веке и сформировались в целостную систему к началу XX века в работе проф. А.К.Крупского. В дальнейшем эти идеи получили развитие в работах проф. И.А.Тищенко, А.А.Кирова, Л.Ф.Фокина, К.Ф.Павлова, Г.М.Знаменского и других отечественных ученых, а также в работах Шервуда, Льюиса, Уоккера и др.

Знание сущности явлений, происходящих в ходе выполнения процессов на оборудовании пищевых производств, необходимо для нахождения оптимальных режимов обработки пищевого сырья, создания новых конструкций энерго- и ресурсосберегающего технологического оборудования. При этом оптимизация процессов и аппаратов пищевых производств неразрывно связана со знанием физико-механических свойств сырья и готовой продукции, поскольку параметры работы оборудования и выполнение технологических операций в огромной степени зависят от этих свойств.

Знание и использование свойств пищевых материалов, особенностей протекания того или иного процесса трансформации сырья в готовую продукцию, знание характера взаимодействия материала и рабочих органов позволит повысить качество выпускаемой продукции и техническую культуру

пищевых производств.

Лекция 1. Основные сведения о процессах и аппаратах пищевых производств и методах их исследований

Вопросы:

- 1.1. Основные сведения о процессах. Предмет и задачи курса.
- 1.2. Определение выходных параметров технологических процессов.
- 1.3. Характеристики моделей процессов как объектов исследований.
- 1.4. Основные принципы исследования процессов.
- 1.5. Основные положения теории подобия. Метод анализа размерностей.

Условные обозначения.

Глоссарий.

Контрольные вопросы.

1.1. Основные сведения о процессах. Предмет и задачи курса

На основе дисциплины «Процессы и аппараты пищевых производств» формируются специальные дисциплины и дисциплины специализаций направления подготовки бакалавра в области технологии общественного питания, такие как «Технология продуктов общественного питания», «Оборудование предприятий общественного питания» и др. Курс «Процессы и аппараты» в свою очередь базируется на предшествующих дисциплинах естественно-математического цикла – технической механике, гидравлике, химии.

Предметом изучения данного курса являются основные характерные процессы преобразования пищевого сырья в полуфабрикаты и готовую продукцию: механические, гидромеханические, тепломассообменные, мембранные и их аппаратурная составляющая.

К основным задачам данной дисциплины относятся:

- изучение сущности и структуры процессов трансформации пищевого сырья в полуфабрикаты и готовую продукцию;
- определение выходных параметров технологических процессов и оценка их эффективности;
- изучение методов интенсификации и оптимизации процессов;

– изучение устройства и принципа действия технологического оборудования, реализующего данные процессы.

Глубокое усвоение материала курса неразрывно связано с изучением смежных дисциплин: «Гидравлика», «Реология пищевых продуктов», «Теплотехника».

Технологический процесс в соответствии с определением ГОСТ 3.1109 – это часть производственного процесса, содержащая действия по изменению и последующему определению состояния предмета производства. Другое определение технологического процесса заключается в том, что он рассматривается как совокупность операций по преобразованию исходного материала в готовую продукцию.

Технология – это наука о практическом применении фундаментальных законов естественных наук для технологических целей, обосновывающая методы и способствующая созданию средств для переработки сырья. Условно технология делится на механическую и химическую технологии, первая изучает изменения физических свойств и формы обрабатываемых материалов, вторая – процессы, связанные с химическими превращениями материалов. Например, производство многих пищевых продуктов, таких как сахар, крахмал, дрожжи, хлеб и др. является предметом изучения химической технологии

Технологические процессы пищевых производств применительно к той или иной отрасли пищевой промышленности представляют собой сложный комплекс механических, химических, биологических и других явлений. Использование множества видов сырья и изменение по ходу переработки формы и состояний этого сырья затрудняет исследование технологических процессов и требует постоянного контроля свойств получаемых полуфабрикатов и продуктов на разных стадиях обработки.

При производстве пищевых продуктов могут осуществляться как одинаковые процессы, например, перемешивание или выпаривание различных пищевых сред, так и специфичные, характерные только для данного вида производства, например, процесс брожения и др.

Методологическим подходом изучения данного курса является рассмотрение общих принципов или общих начал, на которых основываются технологические операции, как это отмечали основоположники курса «Процессов и аппаратов» проф. А.К.Крупский и И.А.Тищенко.

Как отмечает В.Н. Стабников, изучение курса «Процессы и аппараты пищевых производств» «расширяет технический кругозор и знакомит с комплексом основных процессов, из которых строится любая технология».

За время существования курса определились три основные группы процессов:

- механические и гидромеханические;
- тепловые;
- массообменные (тепломассообменные).

Самостоятельное ответвление механических (гидромеханических) процессов составляют мембранные процессы, которые интенсивно развиваются за последнее время.

К механическим процессам относятся процессы, в которых осуществляется механическое воздействие на материал. Изучение этих процессов базируется на законах механики твердых, жидких и газообразных сред. К механическим процессам относятся: *измельчение, сортирование (сепарирование), прессование, экструдирование, гомогенизация, перемешивание, осаждение, фильтрование, центрифугование*. Движущими силами этих процессов являются силы механического воздействия, гравитационные и центробежные силы, силы гидростатического и гидродинамического давления.

Тепловые процессы характеризуются изменением теплового содержания взаимодействующих сред. К ним относятся: *нагревание и охлаждение, выпаривание, конденсация*. Движущей силой таких процессов является разность контактирующих сред.

В тепло- массообменных процессах, наряду с теплообменом, большую роль играет массообмен между фазами. К таким процессам относятся: *сорбция*

(абсорбция и адсорбция), экстрагирование, сушка, кристаллизация, перегонка. Движущей силой этих процессов, помимо температурного градиента, является разность концентраций веществ.

Количественная и качественная оценка сырья, полуфабрикатов и готовой продукции, часто неоднородных по структуре и свойствам, обуславливает в ходе обработки широкое использование методов математической статистики и теории вероятностей, поскольку многие процессы пищевых производств, особенно процессы механической обработки, по своей сути базируются на вероятностных схемах с закономерностями, свойственными случайным событиям массового характера.

Пищевые производства могут быть как дискретными, так и непрерывно-поточными. Непрерывность процессов получения продукции обуславливает при исследовании процессов использование методов теории случайных функций и статистической динамики.

Изменение реологических показателей сырья и релаксационные явления, происходящие в обрабатываемых материалах, не стационарность некоторых процессов, а также влияние факторов окружающей среды, в свою очередь, осложняют исследование процессов и аппаратов. Кроме того, быстротечность операций и закрытость рабочих зон машин и аппаратов затрудняют визуальное наблюдение и регистрацию основных параметров процесса.

1.2. Определение выходных параметров технологических процессов

Выбор рационального технологического процесса относится к технико-экономическим задачам.

Графические и текстовые документы, определяющие технологические процессы, их входные и выходные параметры при продукции на машинах и аппаратах пищевых производств включают в себя технические условия (ТУ), технологические инструкции (ТИ), технологические схемы, рецептуры, нормы расхода и другую нормативно-техническую документацию.

Проектирование технологического процесса в общем виде может быть представлено в виде следующей последовательности:

- выбор вида сырья и технологии его переработки;
- выбор оборудования и средств оснащения процесса, которые могут обеспечить выпуск продукции заданного качества в необходимом количестве в единицу времени;
- назначение рациональных режимов работы машин и аппаратов;
- определение затрат для различных сочетаний первых трех пунктов;
- выбор оптимального варианта технологического процесса.

Схематично на рис. 1.1 изображена блок-схема системы процессов по получению готовой продукции.

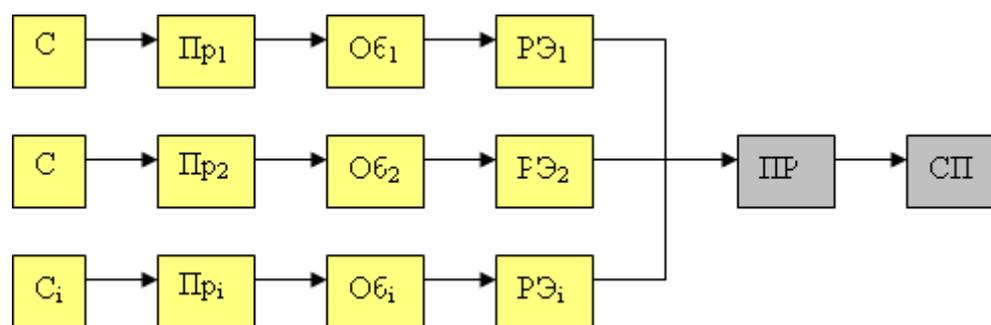


Рис. 1.1. Схема процесса получения готовой продукции:

C – вид сырья; PR – технологический процесс обработки сырья; Ob – оборудование; $РЭ$ – режим эксплуатации; PR – объем готовой продукции; $СП$ – себестоимость продукции

В определенном смысле совокупный технологический процесс получения готовой продукции можно рассматривать как функцию $f(C_i, Pr_i, Ob_i, PЭ_i)$.

Большой практический интерес представляет решение задачи по оценке длительности производства продукции в условиях, когда каждая отдельная операция связывается с определенным типом аппарата или машины, а число аппаратов каждого вида ограничено. Типичным примером такой ситуации может служить, например, производство хлебобулочной продукции в условиях малого или среднего предприятия.

Решение подобных задач может быть получено методом теории расписаний. Общеизвестной задачей теории расписаний является проблема

составления расписания работы линии, известной как задача Джонсона [6], формулируемой следующим образом: требуется за минимальное время получить партию m полуфабрикатов, каждый из которых должен последовательно пройти обработку на каждом из n аппаратов или машин линии при известном времени обработки τ_{ij} i -го полуфабриката ($i = 1, 2, \dots, m$) на j -м аппарате ($j = 1, 2, \dots, n$).

Основная сложность решения данной задачи состоит в определении того порядка запуска, который обеспечивает минимум длины расписания. При большом числе видов полуфабрикатов и аппаратов решение задачи связано с перебором $(m!)^n$ возможных вариантов порядка запуска и сравнения длительности их расписания. Объем вычислений требует использования мощных ЭВМ. Для решения подобных задач используются эвристические методы, ограничивающие количество переборов, или метод «ветвей и границ».

Алгоритм запуска полуфабрикатов состоит в следующем:

- определяется множество номеров полуфабрикатов $J_1 = \{i / \tau_{i1} > \tau_{i2}\}$, т.е. список видов полуфабрикатов, для которых время обработки на втором агрегате меньше, чем время обработки на первом, т.е. выделяется множество полуфабрикатов, для которых узким местом является первый агрегат (машина или аппарат);

- определяется множество номеров полуфабрикатов $J_2 = \{i / \tau_{i1} \leq \tau_{i2}\}$, т.е. список видов полуфабрикатов, для которых время обработки на первом агрегате меньше, чем время обработки на втором, т.е. выделяется множество полуфабрикатов, для которых узким местом является второй агрегат;

- внутри множества J_1 номера полуфабрикатов упорядочиваются по убыванию величин τ_{i2} (по мере убывания τ_{i2});

- внутри множества J_2 номера полуфабрикатов упорядочиваются по мере возрастания величин τ_{i1} (по мере возрастания);

- первыми запускаются полуфабрикаты из множества J_2 , а затем полуфабрикаты из множества J_1 , т.е. сначала запускаются те полуфабрикаты,

узкое место которых расположено дальше по линии. Такая последовательность запуска обеспечивает минимальную длительность выполнения задания.

Пример. Хлебобулочное производство выпускает пять видов мучных кондитерских изделий ($m = 5$). Длительность (в условных единицах) обработки полуфабрикатов на тестоделительной (№1) и тестораскатывающей (№2) машинах приведена в табл. 1.1

Таблица 1.1

Длительность обработки полуфабрикатов

Тип машины	Вид полуфабриката и время обработки (условные единицы)				
	1	2	3	4	5
№1	4	4	7	6	2
№2	5	1	4	7	3

- определяем множество $J_1 = \{2,3\}$;
- определяем множество $J_2 = \{1,4,5\}$;
- упорядочиваем множество $J_1 = \{3,2\}$;
- упорядочиваем множество $J_2 = \{5,1,4\}$;
- определяем порядок запуска полуфабрикатов $J = \{5,1,4,3,2\}$;
- строим диаграмму запуска полуфабрикатов (рис. 1.2).

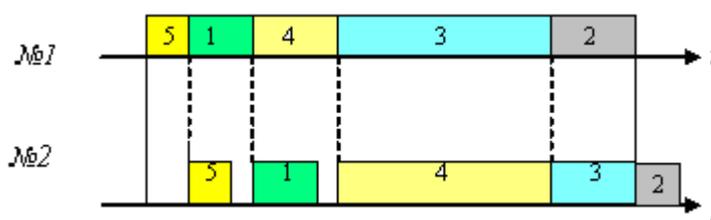


Рис. 1.2. Диаграмма запуска полуфабрикатов в производство

В любом протекающем процессе происходит взаимодействие энергии и вещества. Схему такого взаимодействия, абстрагируясь от физических и химических явлений преобразования, можно наглядно представить в виде «черного ящика», который будет представлять собой некий аппарат, преобразующий какое-то сырье в готовую продукцию. На вход этого ящика поступает ряд компонентов, участвующих в процессе, из которых

вырабатывается искомый продукт. На выходе из ящика будет наблюдаться другие, уже преобразованные вещества. Очевидно, в соответствии с законом сохранения материи общее массовое количество входящих в аппарат компонентов должно быть равно массовому количеству выходящих из этого ящика веществ, т.е. должен наблюдаться баланс между входящими и выходящими веществами. Уравнение, связывающее массы входящих и выходящих веществ, называется *уравнением материального баланса*.

Поскольку преобразование веществ происходит под действием энергии, и каждое вещество, входящее в аппарат, является ее носителем, то аналогично с уравнением материального баланса можно записать уравнение энергетического баланса. Это уравнение в соответствии с законом сохранения энергии будет увязывать соотношения между входящей энергией, потерями энергии, энергией, выделяемой внутри аппарата при преобразовании вещества и отведенной энергией. Наиболее часто, например, при анализе тепловых процессов, составляется уравнение теплового баланса аппарата, в котором учитываются все затраты тепла.

1.3. Характеристики моделей процессов как объектов исследований

Подготовка любого нового производства начинается с проработки схемы, определяющей последовательность технологических операций и особенностей их протекания, что осуществляется в лабораторных условиях и позволяет в результате получить данные, которые будут характеризовать способ производства. На следующем этапе отработка параметров процесса – режимов, компоновки технологической установки, проверки отдельных конструктивно-технологических решений и т.д. осуществляется на экспериментальных образцах, являющихся моделями или прототипами будущих машин и аппаратов.

Большинство процессов пищевых производств и объектов пищевой промышленности характеризуется значительным числом взаимосвязанных

факторов и случайными изменениями параметров во времени. Поэтому изучение и исследование процессов проводятся с целью:

- раскрытия сущности и закономерности процессов;
- определения оптимального режима работы объекта (аппарата или технологической машины);
- определения характеристик объекта.

Методика исследования процессов в оборудовании пищевых производств включает следующие виды работ:

- изучение физических явлений в статике и в динамике;
- теоретическое и экспериментальное исследование процессов на моделях в лабораторных и производственных условиях;
- обобщение полученных данных на основе математического описания и анализа физической сущности процессов с использованием теории подобия физических явлений;
- представление результатов анализа в форме расчетных зависимостей для создания нового оборудования и определения его технико-экономических показателей.

Этап моделирования позволяет решить ряд вопросов о размерах установки, конструкции ее основных узлов, получить данные о стоимости, выходе продукции, удельных расходах сырья, удельной материалоемкости и энергоемкости.

Результаты исследований могут быть представлены в виде таблиц, графиков, уравнений или в численном виде, т.е. в виде математического описания процесса. Математическое описание обеспечивает предсказание хода процесса и его ожидаемых результатов. Оно используется для проверки теоретических положений. Без знания закономерностей, которым подчиняется тот или иной процесс и которые описываются расчетными формулами и получаемыми из них количественными оценками, нельзя создать современное технологическое оборудование и средства его автоматического управления и регулирования.

Для создания автоматизированного оборудования нужны данные о пределах изменения параметров процесса, т.е. конечных и начальных состояниях, о закономерностях изменения этих параметров во времени, что обеспечивается уравнениями кинетики, и характере реакции на возмущающие воздействия, без чего нельзя разработать оптимальное управление.

Сущность математического описания процесса, системы или объекта заключается в получении математической модели или соответствия, связывающего характеристики входящего материала и выходящего продукта, $Y = \mathfrak{R}(x)$, где $\mathfrak{R}\{ \}$ – оператор, характеризующий математическую операцию преобразования входных функций $x_i(t)$ в выходные функции $Y_i(t)$.

Отсутствие модели и недостаточные знания динамических свойств объекта приводят к интуитивному (неоптимальному) управлению процессом и невозможности прогнозирования свойств получаемой продукции.

Математическая модель процесса является адекватной объекту, если она с приемлемой точностью отражает его поведение.

Основу классификации моделей составляют следующие признаки:

1. Число факторов, от которых зависит оператор системы и параметры процесса:

– если оператор $\mathfrak{R}\{ \}$ или входные параметры $x_i(t)$ не зависят от аргументов, то математическая модель называется *статической*. Этот вид моделей описывается алгебраическим уравнением $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$;

– если входной параметр или оператор зависят от аргументов, то модель называется *динамической*;

– если входной параметр или оператор зависят только от одного аргумента, то модель называется *моделью с сосредоточенными параметрами* - $Y(t) = \mathfrak{R}\{x(t)\}$. Этот класс моделей описывается обыкновенными дифференциальными уравнениями;

– если число независимых аргументов более одного (время и пространственные координаты), то такая модель называется *моделью с*

распределенными параметрами – $Y(t, \alpha, \beta, \gamma) = \mathfrak{R}\{x(t, \alpha, \beta, \gamma)\}$.

Такая модель описывается дифференциальными уравнениями с частными производными.

Входные параметры процесса могут обладать свойством однородности. Параметр x является однородным по аргументу α , если изменение α на произвольную величину $\Delta\alpha$ не изменяет параметр, т.е. $x(\alpha) = x(\alpha + \Delta\alpha)$. Если аргументом, по которому однороден параметр или оператор является время, то параметр называется *стационарным*. Система, оператор которой стационарен, называется стационарной.

2. Природа исследуемого процесса или объекта. По данному признаку модели делятся на *вероятностные* и *детерминированные*. В вероятностных моделях учитывается случайная природа входных параметров или оператора. Примерами таких моделей являются модели смешивания сыпучих частиц различных видов. Эти модели могут быть *регрессионными* или *корреляционными*:

– если выходной параметр процесса представляет собой случайную величину, а фактор (входной параметр) является неслучайным, то математическая модель называется *регрессионной*, например,
 $Y = b_0 \pm b_1 x_1 \pm b_2 x_2 \pm \dots \pm b_n x_n \pm b_{12} x_1 x_2 \pm \dots$;

– если выходной и входной параметры представляют собой случайные величины с определенным законом распределения, то взаимосвязь между ними или математическая модель процесса называется *корреляционной*;

– в детерминированных моделях выходные параметры однозначно определяются факторами и оператором процесса.

3. *Свойство линейности модели*. Математическая модель называется линейной, если линеен оператор системы. Оператор $\mathfrak{R}\{ \}$ называется линейным, если выполняется принцип суперпозиции (равенство):

$$\mathfrak{R}\{x + \Delta x\} = \mathfrak{R}\{x\} + \mathfrak{R}\{\Delta x\},$$

где Δx – приращение фактора.

Методы получения моделей процессов подразделяются на *теоретические* и *экспериментальные*.

Теоретический метод заключается в анализе физической сущности процесса с использованием общих законов физики или в составлении уравнений материального или энергетического баланса.

Экспериментальный метод математического описания процесса или объекта заключается в обработке экспериментальных данных.

Наиболее эффективным способом получения той или иной модели является сочетание теоретического и экспериментального методов, где теоретический анализ затрагивает в основном структурные свойства объекта и получение уравнений, а на долю экспериментального метода приходится количественный анализ по определению численных значений коэффициентов уравнений и проверка теоретических выводов.

Одним из основных средств экспериментального изучения объектов являются методы, использующие математическую статистику (дисперсионный анализ и др.). При исследованиях производственных процессов и объектов, находящихся в непрерывной эксплуатации, возникает ряд сложностей, обусловленных:

- большим числом взаимосвязей факторов;
- высоким уровнем помех, природа которых носит случайный характер;
- трудоемкостью обработки данных;
- нарушением нормального режима работы объекта.

Экспериментальные методы получения моделей могут быть *пассивными* и *активными*. При пассивном эксперименте информация о параметрах процесса получается путем регистрации и наблюдения без какого-либо воздействия на исследуемый объект со стороны наблюдателя. При активном эксперименте информацию о параметрах процесса получают путем направленного изменения входных факторов в соответствии с составленным планом эксперимента.

В реальных условиях эксплуатации объекта активный эксперимент не

всегда возможен, поскольку может привести к браку продукции и дестабилизации технологического процесса.

Общим недостатком обоих методов получения информации о процессе или объекте является то, что получаемые с их помощью модели приемлемы лишь в диапазоне варьирования (изменения или существования) исследуемых факторов. Экстраполяция экспериментально построенной модели одного процесса на другой, даже полностью аналогичный, как правило, некорректна.

При получении статических моделей используются следующие методы:

– в пассивном эксперименте – регрессионный и корреляционный анализ, метод последовательного исключения функций;

– в активном эксперименте – факторные планы.

Для получения динамических моделей используются:

– в пассивном эксперименте – корреляционный, спектральный и динамический регрессионный анализ;

– в активном эксперименте – методы пробных возмущений.

Выбор метода получения модели определяется показателями процесса и объекта, задачами исследования и условиями применения метода.

1.4. Основные принципы исследования процессов

При протекании процессов происходит взаимодействие тел, например, обрабатываемой среды и рабочего органа, компонентов между собой и др. Взаимодействия могут носить механический, тепловой или диффузионный характер. Взаимодействующие между собой тела образует систему. Системы делятся на однородные (с одинаковыми свойствами) и неоднородные. Предоставленные сами себе системы всегда стремятся к устойчивому состоянию, которое характеризуется наименьшим уровнем энергии на поддержание такого состояния. Системы, находящиеся в состоянии равновесия, называются равновесными системами. Примером равновесной системы может служить однородная жидкая среда, у которой давление и температура

одинаковы во всех ее частях. Для вывода системы из состояния равновесия необходимо затратить определенную энергию.

Согласно принципу Ле-Шателье в системе, выведенной из состояния равновесия, происходят изменения, направления которых противоположны силам, выводящим систему из равновесия. Применение данного принципа позволяет выяснить реакцию системы на изменение, например, давления, температуры или концентрации.

Кинетика протекания процессов подтверждает, что скорость протекания процесса пропорциональна величине движущей силы процесса и обратно пропорциональна сопротивлению. Приведем для иллюстрации несколько примеров разнородных процессов, кинетические уравнения которых могут быть сведены к одному общему виду.

Известное из термодинамики выражение для скорости передачи тепла имеет вид:

$$\frac{dQ}{d\tau} = k\Delta t = \frac{1}{R} \Delta t,$$

где Q – количество тепла;

τ – время;

Δt – движущая сила процесса перехода тепла, выражаемая в градусах (разность температур);

k – коэффициент теплопередачи;

$R = 1/k$ – сопротивление переходу тепла.

Для диффузионного процесса, описывающего переход массы можно записать уравнение:

$$\frac{dM}{d\tau} = k'\Delta C = \frac{1}{R'} \Delta C,$$

где dM – количество переданной массы вещества за время $d\tau$;

k' – коэффициент пропорциональности, характеризующий интенсивность передачи массы;

R' – сопротивление передаче массы;

ΔC – движущая сила процесса (разность концентраций веществ).

Аналогично для процесса фильтрации кинетическое уравнение будет иметь вид:

$$\frac{dW}{d\tau} = k_g \Delta p = \frac{1}{R_g} \Delta p,$$

где dW – количество фильтрата за время $d\tau$;

Δp – движущая сила процесса фильтрации (разность давлений);

R_g – гидравлическое сопротивление фильтра и осадка;

k_g – коэффициент пропорциональности, характеризующий проводимость фильтрующей среды.

Приведенные выше кинетические уравнения могут быть приведены к одному и тому же виду:

$$I = LX,$$

где I – оператор скорости процесса;

X – движущая сила процесса;

L – скалярная величина, характеризующая величину проводимости и обратно пропорциональная сопротивлению.

Использование аналитических методов при решении технологических, задач предполагает описание изучаемых процессов и систем определенными математическими соотношениями.

Изучение процессов должно проводиться не только в конечных состояниях в статике, но и во времени, т.е. в динамике. Совместное изучение статики (условий равновесия), кинетики (характера движущих сил) и динамики процессов (изменения параметров во времени) позволяет глубже установить взаимосвязи в ходе выполнения процесса и выбрать оптимальные параметры.

Реальные системы относятся к сложным многопараметрическим объектам с изменяемыми параметрами. Эти системы подвергаются различным внешним и внутренним возмущениям, поэтому их математическое описание представляет сложную задачу. Поэтому для формального описания используются более простые математические модели процессов. Любая математическая модель строится по некоторой общей схеме:

– технико-экономическая система представляется как совокупность более мелких подсистем и объектов;

– каждый объект характеризуется множеством наборов чисел, указывающих, например, на выпущенный объем продукции, потребленные ресурсы и т.п. Математические соотношения, описывающие это множество, называются *локальными ограничениями*, характерными только для данного процесса или объекта;

– соотношения, описывающие внешние связи, называются *глобальными ограничениями*;

– модель должна включать описание цели.

Все разнообразие задач, возникающих при управлении системой, в которой реализуются те или иные процессы, можно условно разбить на два класса:

– *задачи планирования* – составления плана функционирования объекта, содержащие идентификацию всех потоков продукции с учетом ограничений и цели. Данная модель должна быть простой. Этому требованию отвечают линейные детерминированные модели. Получаемые в этом случае результаты рассматриваются как ориентировочные и должны уточняться в процессе выполнения плана;

– *задачи управления*, заключающиеся в достижении целей всей системы.

Оптимальность плана означает минимизацию или максимизацию значений некоторой функции. Нахождение экстремума функции является классической задачей математического анализа, когда переменные могут изменяться во всем пространстве без каких-либо ограничений. Если функция непрерывно дифференцируема, то экстремальные значения будут в точках, в которых обращаются в нуль все частные производные функции. Однако на практике область переменных имеет ограничения в виде неравенств, например, *ресурс i -го сырья ограничен такой-то величиной* и т.п., поэтому в отличие от классической задачи математического анализа речь идет об условном экстремуме функции, когда ее производные не обращаются в нуль.

В самых разных областях инженерной практики, в т.ч. при проведении исследований процессов пищевых производств, имеются задачи, обладающие рядом общих признаков, сходные по постановке и методам решения. Эти задачи объединяются под общим термином – *задачи исследования операций*. Например, типичная ситуация в общем случае может быть сформулирована так: *организуются какие-то действия, которые можно выполнить различными способами, и надо выбрать определенное решение из ряда возможных вариантов*. Исходя из такой формулировки, исследование операций будет представлять собой инструмент выявления, анализа и решения различных проблем в сложных системах.

Задачи исследования операций делятся на два вида: *прямые* и *обратные*. Прямые задачи отвечают на вопрос: *что будет, если в заданных условиях принято какое-то решение $x \in X$, и чему будет равен при данном решении выбранный показатель эффективности процесса W* . Обратные задачи отвечают на вопрос: *как выбрать решение x , чтобы показатель эффективности обратился в экстремум*.

В общем виде задача формулируется следующим образом: пусть имеется некий процесс, в котором реализуется некая операция Q , на исход которой можно влиять, выбирая тем или иным способом решение x (здесь x не число, а группа параметров). При известных условиях операции, т.е. не содержащих неопределенности, все факторы, от которых зависит исход, можно разделить на две группы:

- заданные факторы α ;
- зависящие от субъекта элементы решения, образующие в совокупности решение x .

Первая группа факторов содержит ограничения, которые определяют область возможных решений X . Показатель эффективности зависит от обеих групп факторов, $W = W(\alpha, x)$.

Обратная задача формулируется следующим образом: при заданных условиях α надо найти такое решение $x = x^*$, которое обращает показатель

эффективности в максимум $W^* = \max_{x \in X} \{W(\alpha, x)\}$. На практике задачи исследования операций, помимо двух групп факторов, содержат еще одну группу ξ -неизвестные или неконтролируемые факторы, т.е. $W = W(\alpha, x, \xi)$. Наличие случайных факторов переводит задачу о выборе решения в условиях неопределенности и любое решение, принимаемое при этом, будет хуже решения, принятого при заранее известных условиях. В этом случае к точности решения нельзя предъявлять слишком высоких требований. Вместо одного единственного решения лучше выделить область решений Ω , которые оказываются несущественно хуже других. В пределах этой области и должен проводиться выбор окончательного решения.

1.5. Основные положения теории подобия. Метод анализа размерностей.

Из большого спектра инженерных задач по исследованию технологических процессов и аппаратов пищевых производств обширный класс составляют задачи, в которых требуется определить параметры той или иной операции процесса из составленных исследователем уравнений, описывающих данный процесс. При теоретических исследованиях, когда для нахождения количественных зависимостей используются общие законы физики, их приложение к исследуемым явлениям позволяет получать и общие связи между параметрами явления и применять их для решения широкого класса задач. Примером может служить дифференциальное уравнение второго порядка, описывающее явление теплопроводности $\partial t / \partial \tau = a \nabla^2 t$. Это уравнение не содержит конкретных значений отдельных величин, а только характеризует общую связь между величинами и поэтому может быть использовано для описания свойств целого класса явлений теплопроводности. Отсюда следует, что любое дифференциальное уравнение является математической моделью явлений с одинаковой физикой протекающих процессов. При этом следует иметь в виду, что по форме уравнения могут быть идентичными, однако по физическому содержанию описывать совершенно другой класс явлений.

Примером может служить дифференциальное уравнение нестационарного процесса переноса вещества $\partial C / \partial \tau = D(\partial^2 C / \partial x^2)$, которое по форме одинаково с уравнением теплопроводности, но служит для описания другого класса явлений.

Из теории дифференциального исчисления известно, что интегрирование любого дифференциального уравнения дает бесчисленное множество различных решений. Для получения частного решения необходимо задать определенные условия, которые должны однозначно определять единичное явление. Эти условия называются *условиями однозначности* и содержат все особенности данного конкретного явления.

Условия однозначности состоят из геометрических условий, характеризующих форму и размеры объекта, физических условий и граничных условий, характеризующих взаимодействие объекта с окружающей средой, а также временных условий для нестационарных процессов.

Таким образом, конкретное единичное явление полностью определяется дифференциальным уравнением с четырьмя условиями однозначности.

На практике очень часто встречаются ситуации, когда найти решение, которое удовлетворяло бы дифференциальному уравнению и условиям однозначности, невозможно. В этом случае целесообразно объединение экспериментального и математического методов в одну систему. Такое объединение может быть осуществлено на основе *теории подобия*, которая позволяет сделать определенные выводы из математической модели с условиями однозначности без интегрирования составленных уравнений и подводит теоретическую базу для получения экспериментальных данных и их обработки.

В теории подобия, кроме класса и единичного явления, используется понятие группы явлений, под которой понимается совокупность процессов, описываемых одинаковыми по форме и содержанию уравнениями и одинаковыми по форме и содержанию условиями однозначности. То есть различие между процессами будет состоять только в различии численных

значений величин, входящих в условия однозначности. Группа явлений выделяется путем умножения каждой величины, входящей в условия однозначности, на постоянные численные множители.

Геометрическое подобие. Из рис. 1.3 видно, что известные геометрические условия могут быть записаны следующим образом:

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{b_1}{b_2} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{d_1}{d_2} = \frac{f_1}{f_2} = K_{\mathfrak{R}},$$

или в общем виде:

$$\mathfrak{R}_1 / \mathfrak{R}_2 = const.$$

То есть для двух геометрически подобных фигур отношение сходных линейных размеров есть величина постоянная. Эта величина обозначается $K_{\mathfrak{R}}$ и называется множителем масштабного преобразования.

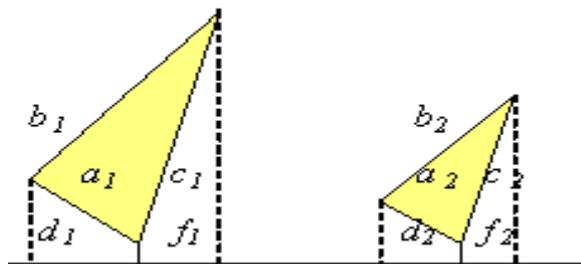


Рис. 1.3. Геометрическое подобие фигур

Площади поверхности фигур будут относиться друг к другу как квадраты их линейных размеров: $S_1 / S_2 = \mathfrak{R}_1^2 / \mathfrak{R}_2^2 = K_S$ или $K_S = K_{\mathfrak{R}}^2$. Аналогично для объемов $K_V = K_{\mathfrak{R}}^3 = K_S K_{\mathfrak{R}}$.

Для геометрически подобных фигур имеется еще одно свойство, называемое *инвариантностью подобия*: отношение (инвариант подобия) между двумя любыми величинами, имеющими одинаковую размерность для одной системы, равно отношению соответствующих величин другой системы:

$$\frac{a_1}{b_1} = \frac{a_2}{b_2} = i_{\mathfrak{R}} = const.$$

Физическое подобие. Принципы подобия приложимы также к физическим явлениям. Константы подобия одинаковы для конечных и

бесконечно малых величин, т.е. $R_1 / R_2 = R'_1 / R'_2 = Q_1 = (R_1 - R'_1) / (R_2 - R'_2) = \Delta R_1 / \Delta R_2$.
После перехода к пределу $Q_1 = dR_1 / dR_2$.

Нахождение констант подобия рассмотрим на примере уравнения, выражающего условия теплообмена на границе двух сред $\alpha = -(\lambda / \Delta t)(\partial t / \partial n)_{n \rightarrow 0}$.

Для сходственных точек двух подобных систем:

– первая система $\alpha' = -(\lambda' / \Delta t')(\partial t' / \partial n')$;

– вторая система $\alpha'' = -(\lambda'' / \Delta t'')(\partial t'' / \partial n'')$.

Константы подобия:

$$C_\alpha = \alpha'' / \alpha', \quad C_\lambda = \lambda'' / \lambda', \quad C_t = \Delta t'' / \Delta t', \quad C_l = n'' / n' = l'' / l',$$

где l – характерный размер системы.

Или $\alpha'' = C_\alpha \alpha'$ и т.д., подставив эти выражения в уравнение для второй системы, получим:

$$\alpha' = \frac{C_\lambda}{C_\alpha C_l} \frac{\lambda'}{\Delta t'} \frac{\partial t'}{\partial n'}.$$

Из условия тождественности уравнений следует, что $\frac{C_\lambda}{C_\alpha C_l} = 1 = C$, т.е. выбор комплекса констант подобия ограничен условием, что любая их комбинация должна равняться единице.

Заменив значения констант подобия, можно получить безразмерные соотношения параметров, характеризующих процесс. В данном случае $(\alpha' l' / \lambda') = (\alpha'' l'' / \lambda'')$. Такие соотношения называются *числами подобия*. Полученное выше равенство называется числом Нуссельта и обозначается индексом $Nu = (\alpha l) / \lambda = idem$.

Отношения двух однородных, т.е. имеющих одинаковое содержание и размерность, величин называется *симплексом*.

Для характеристики подобия используются константы и числа подобия. Константы сохраняют числовое значение только для двух подобных явлений, но остаются одинаковыми для всех сходственных точек изучаемых систем. Числа подобия сохраняют свое значение в сходственных точках всех подобных систем, но в различных точках данной системы могут иметь разные числовые

значения.

Безразмерные числа подобия – это новые переменные, позволяющие уменьшить число величин под знаком функции. Количественная связь между числами подобия определяется экспериментальным путем. Направление хода эксперимента определяется с помощью теорий размерности и подобия. Теория размерности применяется при неизвестных связях между переменными, когда рассматриваются новые процессы, не имеющие аналитического описания.

После выбора существенных размерных величин, влияющих в наибольшей степени на исследуемый процесс, находят безразмерные комплексы и составляют уравнения подобия без составления дифференциальных уравнений и условий однозначности.

В основе теории подобия физических явлений лежат три теоремы подобия:

– первая теорема: *у подобных явлений индикаторы подобия равны единице, т.е. у подобных явлений числа подобия численно равны.*

Первая теорема устанавливает связь между константами подобия и позволяет вывести уравнения для чисел подобия. Она указывает, что при выполнении опытов необходимо и достаточно измерять лишь те величины, которые входят в числа подобия изучаемого явления.

Пусть в двух подобных системах происходит подобное движение тел. В соответствии со вторым законом Ньютона можно записать $F = m \frac{dv}{dt}$, т.е. для

первой системы $F_1 = m_1 \frac{dv_1}{dt_1}$ и аналогично для второй системы $F_2 = m_2 \frac{dv_2}{dt_2}$.

Поскольку эти две системы отличаются друг от друга только масштабом, то $F_1 = C_F F_2; m_1 = C_m m_2; v_1 = C_v v_2; t_1 = C_t t_2; dv_1 = C_v dv_2; dt_1 = C_t dt_2$. Разделим уравнения

движения одно на другое $\frac{F_1}{F_2} = \frac{m_1}{m_2} \frac{dv_1}{dv_2} \frac{dt_1}{dt_2}$ (1) или $C_F = C_m \frac{C_v}{C_t}$. Следовательно

при подобии двух систем $\frac{C_F C_t}{C_m C_v} = j = 1$. Комплекс множителей данного

преобразования j называется *индикатором подобия* и для двух подобных

явлений он равен единице. Из уравнений (1) следует, что $\frac{F_1 dt_1}{m_1 dv_1} = \frac{F_2 dt_2}{m_2 dv_2}$ и

$\frac{F_1 t_1}{m_1 v_1} = \frac{F_2 t_2}{m_2 v_2}$. Из этих записей следует вывод, что для двух подобных явлений

данного класса сохраняется числовое равенство величин Ft/mv , что записывается как $\frac{Ft}{mv} = inv$ (неизменно) или $\frac{Ft}{mv} = idem$ (одно и то же). Этот комплекс величин носит название критерия Ньютона (Ne).

Таким образом, для ряда подобных процессов будет справедливо равенство $Ne_1 = Ne_2 = Ne_3 = \dots idem$. Если подобные процессы происходят в реальном образце и в его модели, то очевидно $Ne_{mod} = Ne_{обр}$.

Правильность составления критериев проверяется подстановкой размерностей величин. В данном случае $Ne \equiv \frac{Ft}{mv} \left[\frac{н \cdot сек^2}{кг \cdot м} = \frac{н}{н} \right]$, т.е. размерности сокращаются. Критерии подобия являются безразмерными величинами. Отсюда следует, что необходимым условием получения какого-либо безразмерного критерия подобия является наличие исходного уравнения, описывающего исследуемый процесс, причем это уравнение может быть выражено в любой форме (алгебраической или дифференциальной).

– вторая теорема: *если физическое явление описывается системой дифференциальных уравнений, то всегда существует возможность представления их в виде уравнений подобия.*

Из этой теоремы следует, что если результаты любого эксперимента обработать в числах подобия, то зависимость между ними надо выражать в виде уравнения подобия, которое представляет зависимость между величинами, характеризующими явление, в виде чисел подобия. Т.е. критерий подобия $K_1 = f(K_2, K_3, \dots, K_n)$, содержащий определяемую величину, может быть выражен в виде функции других критериев, отражающих другие стороны исследуемого процесса. Вид этой функции заранее неизвестен и определяется при обработке экспериментальных данных. Результаты опытов обычно представляются в

степенном виде $K_1 = AK_2^m K_3^n \dots$, или в экспоненциальной форме:

$$K_1 = K_0 \exp(-\tau / \theta),$$

где A, m, n – постоянные, определяемые при графической обработке опытных данных;

K_0 – начальное значение критерия K_1 при $\tau = 0$;

τ – время от начала процесса;

θ – постоянная времени процесса, зависящая от условий его проведения.

Пример. Требуется найти вид функции $K_1 = f(K_2)$, если есть основания считать, что зависимость между переменными является степенной, т.е. $K_1 = A \cdot K_2^n$. Прологарифмируем данное уравнение, получим $\lg K_1 = \lg A + n \lg K_2$. Это уравнение представляет собой прямую вида $y = a + bx$, где n представляет собой угловой коэффициент прямой, а величина $\lg A$ определяет точку на оси ординат, через которую проходит логарифмическая прямая.

Пусть в результате проведения серии опытов получены следующие числовые значения: $\lg K_1 = (3; 4; 6; \dots)$ и $\lg K_2 = (0,5; 1; 2; \dots)$. Построим прямую в логарифмических координатах (рис.1.4) и найдем неизвестные значения n и A .

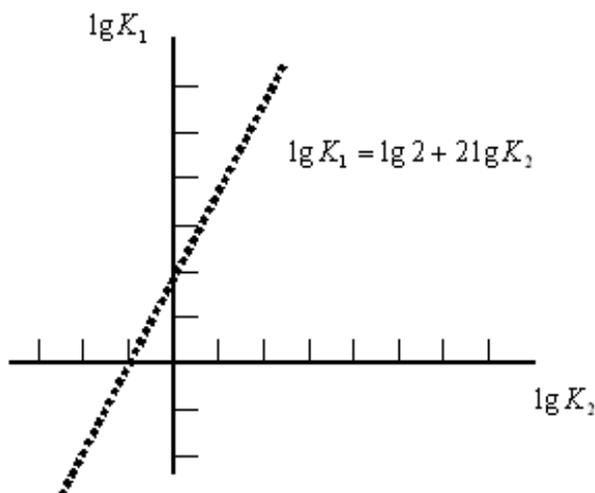


Рис.1.4. График функции $K_1 = A \cdot K_2^n$ в логарифмических координатах

– третья теорема: подобны те явления, условия однозначности которых подобны и числа подобия численно одинаковы. Третья теорема исходит из предположения, что явления протекают в геометрически подобных системах.

Если условия однозначности подобны и определяющие числа подобия равны, то отсюда вытекает равенство всех остальных определяемых чисел подобия, что имеет большое значение для обобщения результатов опыта.

Таким образом, теория подобия дает общие указания и устанавливает пути анализа уравнений, описывающих исследуемые явления.

Как подчеркивается в, многообразии критериев, с помощью которых могут быть описаны процессы пищевых производств затрудняет их классификацию. Для каждого из процессов разработана своя система критериев, с помощью которой составляются критериальные уравнения.

Существуют критерии геометрического, механического, диффузионного, термодинамического подобия и др.

Так, критерии геометрического подобия выступают в форме относительных размеров исследуемой системы, например, $\Gamma_1 = \frac{l}{d}$ – относительная длина трубопровода, т.е. длина трубопровода, измеренная его диаметром, или $\Gamma_2 = \frac{s}{d}$ – относительный шаг трубного пучка в цилиндрическом теплообменнике.

Гидромеханическое подобие характеризуется рядом критериев, полученных из критерия механического подобия Ньютона – это критерии Рейнольдса, Эйлера, Фруда, Галилея

Известно, что аналитическое решение системы дифференциальных уравнений, описывающих явление теплоотдачи, состоящей из отдельных дифференциальных уравнений теплообмена между твердым телом и средой, энергии потока движущейся жидкости или теплопроводности, движения вязкой жидкости и сплошности вместе с условиями однозначности наталкивается на значительные трудности из-за большого количества переменных. Эти трудности можно снять использованием теории подобия, позволяющей объединить размерные физические величины в безразмерные комплексы, рассматриваемые в качестве новых переменных. Такими комплексами для данной системы уравнений будут:

– число подобия гидродинамической гомохронности, характеризующее скорость изменения поля скоростей движущейся жидкости во времени, $Ho = \omega\tau / l = idem$;

– число Фруда, определяющее отношение сил инерции и сил тяжести, $Fr = gl / \omega^2 = idem$. Этот критерий используется в расчетах мешалок, циклонов, центрифуг;

– число Эйлера, характеризующее соотношение между силами давления и силами инерции, $Eu = \Delta p / \rho\omega^2 = idem$. Этот критерий входит в уравнение для определения потерь напора в потоке жидкости и является мерой отношения перепада статического давления к его динамическому напору;

– число Рейнольдса, представляющее отношение сил инерции к силам вязкости и определяющее характер течения жидкости, $Re = \rho\omega l / \mu = idem$.

Из уравнений энергии потока жидкости получают следующие числа подобия:

– число Фурье, характеризующее связь между скоростью изменения температурного поля, физическими параметрами и размерами объекта, $Fo = \alpha\tau / l^2 = idem$;

– число Пекле, являющееся числом подобия конвективного теплообмена, $Pe = \omega l / \alpha = idem$. Если в число Пекле вместо коэффициента теплопроводности α подставить его значение $\lambda / c\rho$ и помножить числитель и знаменатель на избыточную температуру, то $Pe = \frac{\rho c \omega g}{(\lambda / l) g}$, где числитель характеризует теплоту, переносимую конвекцией, а знаменатель – теплоту, переносимую теплопроводностью.

Из уравнений теплообмена следуют числа подобия:

– число Нуссельта, характеризующее конвективный теплообмен между жидкостью и поверхностью твердого тела, $Nu = \alpha l / \lambda = idem$, где α - коэффициент теплоотдачи теплоносителя;

– число Био, $Bi = \alpha l / \lambda = idem$, где α - коэффициент теплоотдачи твердого тела.

Физические свойства жидкости определяются числом Прандтля, $Pr = Pe / Re$.

При исследовании теплообмена в свободном потоке жидкости используют число Фруда, исключая из него скорость ω , которую сложно определить, для чего умножают это число на квадрат числа Рейнольдса получая тем самым число Галилея, $Ga = Fr \cdot Re^2 = gl^3 / v^2 = idem$, характеризующее соотношение силы тяжести и силы молекулярного трения. Критерий Галилея характеризует случаи стекания жидкости по поверхности и встречается в уравнения теплоотдачи при конденсации пара.

Число Архимеда получают умножением числа Галилея на симплекс $(\rho - \rho_0) / \rho_0$, где ρ, ρ_0 – плотности жидкости в двух точках, $Ar = \frac{dl^3}{v^2} \frac{\Delta\rho}{\rho}$, определяющее условия свободного движения среды.

Для случая изменения плотности жидкости в разных ее точках вследствие различия температуры симплекс $(\rho - \rho_0) / \rho_0$ заменяют величиной $\beta\Delta t$, где β – коэффициент объемного расширения среды. В этом случае число Архимеда превращается в число Грасгофа, $Gr = \beta gl^3 \Delta t / v^2 = idem$, характеризующее соотношение подъемной силы и силы молекулярного трения.

Нетрудно видеть, что числа Fr, Ga, Ar, Gr тождественны. Это различные виды одного и того же числа.

Уравнения подобия определяют зависимость между каким-либо числом подобия и другими определяющими числами подобия. Например, при тепловом расчете какого-либо аппарата искомыми величинами являются коэффициент теплоотдачи α и гидравлическое сопротивление Δp . Конвективный теплообмен характеризуется пятью числами подобия: Nu, Eu, Pr, Gr, Re . Здесь число Nu включает неизвестный коэффициент теплоотдачи α , число Eu – искомую величину гидравлического сопротивления при движении жидкости Δp . Эти два числа являются определяемыми, а остальные три – определяющими. Уравнения подобия в данном случае представляются в следующем виде:

$$Nu = f_1(Re, Gr, Pr),$$

$$Eu = f_2(Re, Gr, Pr).$$

Зависимость между числами подобия определяется экспериментальным путем. Эти исследования могут быть проведены на образце или на модели. Условия, которым должна удовлетворять модель и протекающий в ней процесс, определяются с помощью теории подобия. Поскольку подобные друг другу явления некоторой группы представляют одно и то же явление в различных масштабах, то выводы можно распространить на все явления этой группы. Чтобы модель стала идентичной образцу, требуется выполнение следующих условий:

- процессы в натуре и в модели должны иметь одну и ту же природу и описываться одинаковыми аналитическими зависимостями;
- условия однозначности должны быть одинаковыми, кроме численных значений постоянных.

Условия однозначности требуют:

- геометрического подобия образца и модели;
- подобия условий движения продукта во входных сечениях образца и модели;
- подобия физических параметров в сходственных точках образца и модели;
- подобия температурных полей на границах среды.

Рассмотрим несколько примеров вычисления численного значения критериев

***Пример.** Требуется вычислить критерий Рейнольдса $Re = \rho \omega d / \mu = idem$ для случая движения раствора по трубам цилиндрического теплообменника, если диаметр трубы составляет 0,04м, скорость движения раствора 1,5 м/с, массовая концентрация раствора 15%, температура 100⁰С.*

Относительная плотность раствора при данной концентрации и температуре будет равна 1,026, вязкость $\mu = 0,45 \cdot 10^{-3}$ н·сек /м²

$$\text{Re} = \frac{1026 \cdot 1,5 \cdot 0,04}{0,45 \cdot 10^{-3}} = 135066.$$

Пример. Требуется определить критерий Прандтля $\text{Pr} = \mu c / \lambda$ для сливок жирностью 10%, если удельный вес сливок $1,03 \text{ кг/дм}^3$, удельная теплоемкость $c = 0,95 \cdot 4187 \text{ Дж/кг град}$, коэффициент вязкости $\mu = 2 \cdot 10^{-3} \text{ н·сек /м}^2$, коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,45 \cdot 1,394 \text{ Дж/м·сек·град}$.

$$\text{Pr} = \frac{2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,95 \cdot 4187}{0,45 \cdot 1,394} = 16,3.$$

Метод анализа размерностей. В случае, когда исследуемый процесс не имеет еще аналитического описания, критериальное уравнение может быть составлено с помощью метода анализа размерностей на основе использования теоремы, гласящей, что всякое уравнение, связывающее N физических и геометрических величин, размерность которых выражена через n основных единиц измерения, может быть преобразовано в уравнение подобия, связывающее π критериев, где $\pi = N - n$. Теорема определяет число критериев, входящих в критериальное уравнение.

Пример. Требуется исследовать процесс движения вязкой массы по трубопроводу дозатора установки для фасования продукта. Непосредственные наблюдения позволяют предположить, что необходимый перепад давления Δp зависит от скорости движения массы ω , ее вязкости μ , длины трубопровода l , плотности массы ρ , диаметра трубопровода d , а также от ускорения силы тяжести g , т.е. является функцией $\Delta p = f(\omega, \mu, \rho, l, d, g)$. Здесь $N = 7$.

1. Представим зависимость в степенном виде и запишем размерности величин

$$\Delta p = A \omega^m \mu^n \rho^k l^t d^s g^r \quad (1)$$

$$[\Delta p] = [\text{Па}] = [\text{Н} / \text{м}^2] = [\text{кг} / \text{м} \cdot \text{с}^2] = [ML^{-1}T^{-2}];$$

$$[\omega] = [\text{м} / \text{с}] = [LT^{-1}];$$

$$[\mu] = [\text{Нс} / \text{м}^2] = [\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с} / \text{м}^2 \text{с}^2] = [\text{кг} / \text{м} \cdot \text{с}] = [ML^{-1}T^{-1}];$$

$$[\rho] = [\text{кг} / \text{м}^3] = [ML^{-3}];$$

$$[l] = [m] = [L];$$

$$[d] = [m] = [L];$$

$$[g] = [m/c^2] = [LT^{-2}]$$

В размерность входит масса M , длина L , время T . $n=3$ и $\pi = N - n = 4$, т.е. критериальное уравнение должно содержать 4 критерия.

2. Заменим в уравнении (1) соответствующие величины их размерностями

$$[\Delta p] = [\omega]^m [\mu]^n [\rho]^k [l]^t [d]^s [g]^r$$

или

$$ML^{-1}T^{-2} = (LT^{-1})^m (ML^{-1}T^{-1})^n (ML^{-3})^k (L)^t (L)^s (LT^{-2})^r.$$

Преобразуя, получим $ML^{-1}T^{-2} = M^{(n+k)} L^{(m-n-3k+l+s+r)} T^{(-m-n-2r)}$. Приравняв показатели при одинаковых основаниях, получим систему уравнений

$$\begin{cases} m - 2 - 2r - n \\ k = 1 - n \\ s = r - n - t \end{cases}$$

Подставим эти значения в уравнение (1)

$$\Delta p = A \omega^{(2-2r-n)} \mu^n \rho^{(1-n)} l^t d^{(r-n-t)} g^r.$$

Объединяя отдельные величины по степеням, получим

$$\frac{\Delta p}{\rho \omega^2} = A \left(\frac{\omega \rho d}{\mu} \right)^{-n} \left(\frac{\omega^2}{dg} \right)^{-r} \left(\frac{l}{d} \right)^t$$

или в обозначениях критериев

$$Eu = A Re^{-n} Fr^{-r} (l/d)^t.$$

Коэффициент A и показатели степени n, r, t находятся экспериментальным путем.

Условные обозначения

$Y(t)$ – выходной параметр процесса.

$\mathfrak{R}\{ \}$ – оператор, характеризующий математическую операцию преобразования входных функций в выходные.

$x_i(t)$ – входные факторы.

Δx – приращение фактора.

W – показатель эффективности процесса (операции).

Z – система критериев оптимальности.

ξ – возмущающие воздействия (случайные факторы).

Ω – область допустимых решений.

Ho – число подобия гидродинамической гомохронности, характеризующее изменение поля скоростей движущейся жидкости во времени.

Fr – число Фруда, характеризующее соотношение сил инерции и сил тяжести.

Eu – число Эйлера, характеризующее сил давления и сил инерции.

Re – число Рейнольдса, характеризующее соотношение сил инерции и вязкости.

Fo – число Фурье, характеризующее скорость изменения температурного поля.

Pe – число Пекле, характеризующее конвективный теплообмен.

Nu – число Нуссельта, характеризующее конвективный теплообмен между жидкостью и поверхностью твердого тела.

Pr – число Прандтля, характеризующее определенные свойства жидкости.

Bi – число Био, характеризующее соотношения теплоотдачи сред.

Ga – число Галилея, характеризующее соотношения сил тяжести и сил молекулярного трения.

Ar – число Архимеда, характеризующее условия свободно движущейся среды.

Gr – число Грасгофа, характеризующее соотношение подъемной силы и силы молекулярного трения.

K_{gr} – множитель масштабного преобразования геометрически подобных фигур.

Глоссарий

Технологический процесс – часть производственного процесса, содержащая действия по изменению и последующему определению состояния предмета производства.

Операция – всякая система действий, объединенных единым замыслом и направленная на достижение конкретной цели.

Математическая модель процесса – соотношение $Y = \mathfrak{R}\{x\}$, связывающее в математической форме параметры входящего материала и выходящего продукта.

Статическая модель – модель, у которой оператор $\mathfrak{R}\{ \}$ или входные параметры $x_i(t)$ не зависят от аргументов.

Динамическая модель – модель, у которой оператор $\mathfrak{R}\{ \}$ или входные параметры $x_i(t)$ зависят от аргументов.

Модель с сосредоточенными параметрами – модель, у которой параметры процесса или оператор зависят только от одного аргумента.

Модель с распределенными параметрами – модель, у которой параметры процесса или оператор зависят от нескольких аргументов.

Однородность параметра – свойство, при котором входной параметр является по i -му аргументу, если изменение этого аргумента на произвольную величину не меняет данный параметр.

Вероятностная модель – модель, у которой учитывается случайная природа входных факторов или оператора.

Линейная модель – модель, у которой линеен оператор системы и для которой выполняется принцип суперпозиции.

Активный эксперимент – эксперимент, при котором информацию о параметрах процесса получают путем направленного изменения входных параметров в соответствии с планом эксперимента.

Область допустимых решений – совокупность ограничений, накладываемых на неизвестные величины.

Управление процессом – целенаправленное воздействие на параметры

процесса.

Показатель эффективности – количественный критерий, позволяющий сравнивать различные решения и выбирать из них наиболее эффективное.

Прямая задача – задача исследования операций, определяющая показатель эффективности.

Обратная задача – задача определения условий, при которых показатель эффективности принимает экстремальное значение.

Модель, у которой оператор $\mathfrak{R}\{ \}$ или входные параметры $x_i(t)$ не зависят от аргументов.

Многокритериальный процесс – процесс, характеризуемый несколькими показателями эффективности.

Числа подобия – безразмерные соотношения параметров, характеризующие процесс.

Уравнения подобия – уравнения, определяющие зависимость между одним числом подобия и другими определяющими числами подобия.

Условия однозначности – условия, определяющие особенности какого-либо единичного явления с позиций геометрических и физических параметров, взаимодействий с окружающей средой.

Симплекс – отношение двух однородных, имеющих одинаковое содержание и размерность величин.

Первая теорема подобия – теорема, устанавливающая связь между константами подобия и гласящая, что у подобных явлений числа подобия численно равны.

Вторая теорема подобия – теорема, гласящая, что физические явления, описываемые системой дифференциальных уравнений, можно представить в виде уравнений подобия.

Третья теорема подобия – теорема, гласящая, что подобны те явления, условия однозначности которых подобны и числа подобия численно равны.

Критериальное уравнение – уравнение для параметров процесса на основе определяющих критериев, найденных экспериментальным путем.

Контрольные вопросы

1. Что понимают под технологическим процессом производства пищевой продукции?
2. Что понимается под математической моделью процесса?
3. По каким признакам классифицируются модели?
4. Какие существуют способы получения моделей?
5. В чем заключаются основные сложности реализации активного эксперимента в условиях реального производства?
6. Какими условиями определяется выбор того или иного метода получения модели процесса?
7. Что понимается под операцией и под термином «исследование операций»?
8. В чем состоит цель исследования операций?
9. Из каких основных этапов состоит процесс исследований операций?
10. На какие виды делятся задачи исследования операций?
11. Какие методы решения рекомендуются для многокритериальных задач?
12. Какие условия лежат в основе теории подобия?
13. Что понимается под числами и уравнениями подобия?
14. В чем заключается сущность теорем подобия?
15. Какими числами подобия описывается конвективный теплообмен?
16. В каких случаях рекомендуется применять метод анализа размерностей?

Лекция 2. Сущность, назначение и характеристики механических процессов обработки пищевого сырья и полуфабрикатов

Вопросы:

- 2.1. Основные сведения о свойствах и поведении пищевых материалов при механической обработке.

2.2. Процесс измельчения пищевого сырья. Технологическое оборудование для измельчения пищевых масс.

2.3. Процесс сортирования сыпучих материалов и оборудование для сортирования.

2.4. Процесс смешивания пищевых компонентов. Модели и характеристики качества перемешивания. Аппараты для смешивания.

2.5. Обработка пищевых материалов давлением.

2.6. Процессы транспортирования пищевых материалов.

Условные обозначения.

Глоссарий.

Контрольные вопросы.

2.1. Основные сведения о свойствах и поведении пищевых материалов при механической обработке

Характер поведения различных пищевых материалов при механической обработке в рабочих зонах машин и аппаратов во многом определяется особенностями их структурного строения.

Большинство пищевых продуктов представляют собой неоднородные дисперсные системы, состоящие из двух частей: сплошной, называемой *дисперсионной средой*, и входящей в нее в качестве содержимого - *дисперсной фазой*.

Одной из характеристик дисперсных систем является наименьший размер частиц дисперсной фазы a . Степень раздробленности или дисперсности определяется как $D=1/a$. Кроме дисперсности частицы могут быть также охарактеризованы величиной удельной поверхности $S_{уд}$, которая равна отношению величины межфазной поверхности к объёму, занимаемому частицами, $S_{уд} = S/V$. В зависимости от степени дисперсности системы делят на *грубодисперсные* (частицы дисперсной фазы менее 10^{-3} см), *микроретерогенные* ($10^{-3} \dots 10^{-5}$ см) и *ультрамикроретерогенные* или *коллоидные* ($10^{-5} \dots 10^{-7}$ см). В грубодисперсных системах вещество

дисперсионной среды состоит из молекул размером 10^{-8} см, поэтому в таких системах имеется четко выраженная граница раздела между дисперсной фазой и дисперсионной средой.

По агрегатному состоянию дисперсных систем различают:

(*T-T*) – твердые *гетерогенные* системы с твердой дисперсной фазой и средой, например, такие, как шоколад;

(*Ж-T*) – *капиллярные* системы с жидкой дисперсной фазой и твердой дисперсионной средой (мармелад, овощи, фрукты);

(*Г-T*) – *пористые* системы, у которых газообразная дисперсная фаза и твердая дисперсионная среда (пастила, зефир);

(*T-Ж*) – *суспензии*, имеющие твердую дисперсную фазу и жидкую дисперсионную среду (различные виды паст);

(*Ж-Ж*) – *эмульсии*, имеющие жидкие дисперсную фазу и среду, (молочные продукты);

(*Г-Ж*) – *пены* с газообразной дисперсной фазой и жидкой дисперсионной средой (газированные напитки);

(*T-Г*) – *аэрозоли* с твердой дисперсной фазой и газообразной дисперсионной средой (мучная пыль);

(*Ж-Г*) – *аэрозоли* с жидкой дисперсной фазой и газообразной дисперсионной средой (туман).

Суспензии, эмульсии, пены, аэрозоли и порошки относятся к грубодисперсным гетерогенным системам, которые представляют широкий класс различных пищевых продуктов.

Суспензии или взвеси – это системы с размерами частиц $10^{-3} - 10^{-5}$ см, состоят из твердой дисперсной фазы, находящейся в жидкой дисперсионной среде. Типичным процессом образования суспензии является, например процесс получения крахмала; к суспензиям относятся также протертые супы, нерастворимый кофе и др. Получают суспензии, так же как и порошки, методами конденсации и диспергирования. Диспергирование осуществляют механическим дроблением исходного сырья в вальцовых, шаровых или

коллоидных мельницах. По концентрации суспензии могут быть концентрированными (пасты) или разбавленными.

Эмульсии относятся к грубодисперсным системам и представляют собой *нерастворимые* друг в друге жидкие дисперсионную фазу и дисперсионную среду, обладающие разными свойствами. Практически одной из жидкостей всегда является вода, другой – неполярная, нерастворимая в воде жидкость, например, масло. Типичными примерами эмульсий служат жидкие молочные продукты. Молоко – это полидисперсная система, составляющие которой имеют различную степень дисперсности. Так, в теплом молоке жир находится в эмульгированном состоянии, белковые вещества – в коллоидном, а часть солей – в виде истинных растворов. Равномерное распределение дисперсной фазы в среде осуществляется перемешиванием или гомогенизацией. Для повышения стойкости эмульсий к разделению сред из-за слияния капелек дисперсной фазы используют стабилизаторы (поверхностно-активные вещества), которые, адсорбируясь на поверхности капелек, уменьшают их поверхностное натяжение и препятствуют слиянию.

Эмульсии получают механическим диспергированием, т.е. эмульгированием одной жидкости в другой путем перемешивания (взбивания).

Пены представляют собой концентрированные системы с жидкой (в виде пленок) дисперсионной средой и газообразной дисперсной фазой. Пузырьки газа в пенах отделены тонкими слоями дисперсионной среды. При небольшой концентрации пузырьки газа в жидкости имеют сферическую форму и свободно перемещаются по объему жидкости. Это еще не пена, а эмульсия газа в жидкости. Примером такой эмульсии служат газированная вода, шипучие вина и др.

К собственно пенам относятся системы, в которых по объему преобладает газообразная фаза, т.е. пены, как и желатинизированные эмульсии, имеют сплошную ячеистую структуру.

Как структурные соединения пены неустойчивы и быстро разрушаются. В некоторых производствах, например, в дрожжевом, сахарном и др.

образование пен нежелательно. Гашение пен достигают механическим путем или применением веществ, хорошо адсорбирующихся, но не дающих прочных пленок (спиртов, сложных эфиров, органических кислот).

В то же время пенообразование имеет важное практическое значение в производстве хлебобулочных, кондитерских и других видов продуктов питания. Пищевые пены получают интенсивным перемешиванием или взбиванием пищевых ингредиентов.

К грубодисперсным системам, кроме эмульсий, пен и суспензий, относят порошки и аэрозоли.

Порошки – это вещества с твердой дисперсной фазой и газообразной дисперсионной средой. К порошкам относятся различные виды продовольственных товаров – мука, комбикормовые смеси, крахмал, какао и пр. Размер частиц в порошках колеблется в довольно широких пределах от $5 \cdot 10^{-3}$ до $6 \cdot 10^{-2}$ см.

Дисперсность порошков пищевых продуктов оказывает большое влияние на их потребительские свойства. Так, например, вкус кофе и какао в немалой степени зависит от степени дисперсности порошка, а структура теста - от степени дисперсности муки и измельченных добавок, например, муки из сои, тыквы и других обогатителей.

Аэрозоли – это дисперсные системы с газообразной дисперсионной средой. В зависимости от вида дисперсной фазы аэрозоль может быть *туманом* (жидкая дисперсная фаза), *дымом* (газообразная дисперсная фаза) или *пылью* (твердая дисперсная фаза). Различные аэрозоли в большинстве случаев представляют собой отходы производств и загрязняют окружающую среду, поэтому их предельная концентрация нормируется соответствующими регламентами. Примерами таких аэрозолей являются мучная и сахарная пыль, кухонный дым и пр.

Характерным признаком всех грубодисперсных систем является видимость частиц дисперсной фазы в обычный микроскоп или даже невооруженным глазом. Такие частицы, как правило, задерживаются

бумажным фильтром.

Дисперсные коллоидные системы (коллоидные растворы) имеют размер частиц $10^{-5} \dots 10^{-7}$ см. и могут быть получены двумя способами:

- диспергированием – дроблением частиц до коллоидной степени дисперсности (механическое, электрическое, ультразвуковое диспергирование);
- конденсацией – укрупнением частиц при объединении молекул (физическая или химическая конденсация, ультрафильтрация).

При получении коллоидных растворов необходимым условием является нерастворимость веществ в дисперсионной среде.

Поскольку степень дисперсности в коллоидах существенно выше, чем в грубодисперсных системах, то их можно рассматривать как микрогетерогенные системы с высокой дисперсностью. Коллоидные частицы не оседают под действием гравитационных сил, они невидимы в обычный микроскоп и могут наблюдаться в электронном микроскопе. Коллоидные растворы относят к *золям*. Золи занимают среднее положение между истинными растворами и такими дисперсными системами как порошки, суспензии и эмульсии. Для получения коллоидных систем используют ультратонкое измельчение грубодисперсных частиц (получение муки, какао порошка, сахарной пудры, фруктовых и овощных пюре и т.п.) или процесс конденсации (процесс осветления соков).

Высокомолекулярные соединения представляют собой отдельный класс веществ с большим молекулярным весом. Одной из особенностей этих соединений является способность образования молекулами эластичных волокон и пленок. По своему происхождению высокомолекулярные соединения подразделяются на природные и синтетические. К природным соединениям растительного и животного происхождения относятся белки и полисахариды. Белки – это сложные соединения, молекулы которых построены из α - аминокислот. В природе синтез белков из простых неорганических веществ осуществляется растениями (греча, рис, овес, бобовые культуры). К продуктам животного происхождения, содержащим белковые соединения, относятся мясо,

яйца, рыба, молоко и молочные продукты и др.

Высокомолекулярные соединения существуют в четырех физических состояниях: трех аморфных и одном кристаллическом.

Аморфные состояния:

- стекловидное;
- вязкотекучее;
- высокоэластичное.

Белки под влиянием внешних воздействий теряют свои *нативные* (первоначальные) свойства, что выражается в изменении их структуры, например, в свертывании или в выпадении белков в осадок. Типичным примером является свертывание яичного белка при варке яиц. С тепловой денатурацией белка связаны практически все основные операции кулинарной обработки пищевых продуктов (варка, обжаривание, тушение, пропускание, бланширование, выпечка и пр.) Не гидролитическое изменение нативной структуры белка называется *денатурацией*. Денатурация, кроме теплового воздействия на белок, может быть вызвана механическим (взбивание яичных белков или сливок в пену) или кислотным воздействием (скисание молока).

Образование плотно связанных систем, в которых частицы дисперсной фазы ограничены в перемещении относительно друг друга, ведет к структурным изменениям дисперсной системы и образованию новой пространственной структуры. Растворы высокомолекулярных соединений и некоторые коллоидные системы при определенных условиях теряют свою текучесть и отвердевают, превращаясь в *студни*.

Студни (гели) – это дисперсионные системы, в которых частицы дисперсной фазы связаны между собой в сетчатый каркас, а дисперсионная среда находится в его промежутках. С позиций реологии студни – это структурированные системы, обладающие свойствами эластичных твердых тел, и могут рассматриваться по своему состоянию как промежуточные между твердыми и жидкими телами. Например, студнями являются многие виды продуктов – хлеб, мясо, джем, мармелад, овсяный кисель, сыр, творог и др.

Процесс перехода коллоидного раствора из свободно дисперсного состояния в плотно связанное дисперсное состояние называется *процессом гелеобразования*. Динамика процесса (студне)гелеобразования зависит от концентрации частиц, линейной плотности высокомолекулярных соединений, температуры среды и ряда других факторов. С течением времени, вследствие потери агрегативной устойчивости, может произойти воссоединение коллоидных частиц дисперсной фазы и выпадение их в осадок, называемый *коагулятом*.

Самопроизвольный процесс разделения студня на две фазы, сопровождающийся изменением его объема называется *синерезисом* (отмоканием). Если синерезис обратим, т.е. при этом не возникает каких-либо химических реакций, то при нагревании студень может быть возвращен в исходное состояние. Это явление используют в технологии общественного питания для освежения каш, пюре, черствого хлеба и других блюд. Так, в свежее испеченном хлебе количество связанной воды достигает 83%, после пяти суток хранения – 67%, в результате чего хлеб черствеет, т.е. происходит потеря способности продукта сохранять связанную влагу. Скорость синерезиса зависит в основном от температуры и концентрации студней.

В большинстве случаев синерезис не желателен, поскольку приводит к старению продукта, например, очерствению хлеба, кулинарных изделий, сыра и т.д.

Структуры пищевых продуктов по характеру связей между их элементами подразделяют на два основных класса: *коагуляционные и конденсационно-кристаллизационные*.

Коагуляция, по определению, – это процесс взаимофиксации выведенных из состояния агрегативной устойчивости частиц дисперсной фазы, происходящий вследствие их сближения в результате броуновского движения, перемещения в градиентном потоке или иных факторов, сопровождающийся образованием сплошных структурированных систем, обладающих фазовой устойчивостью. Иными словами, коагуляция – это самоукрупнение коллоидных

частиц вследствие уменьшения их суммарной поверхности.

Коагуляционные структуры образуются в дисперсных системах путем взаимодействия частиц и молекул через прослойки дисперсионной среды. Коагуляционные структуры могут находиться как в твердом, так и в жидком состоянии.

Конденсационно-кристаллизационные структуры характерны для большинства натуральных продуктов, однако, могут образовываться и из коагуляционных структур при удалении дисперсионной среды или при соединении частиц дисперсной фазы в растворах. В процессе образования их прочность увеличивается, после разрушения эти структуры не восстанавливаются.

Характер протекания механических, тепловых, диффузионных, электрических процессов в значительной степени определяется структурно-механическими свойствами продуктов и зависит от их внутреннего строения и состава, характера взаимодействия частиц или молекул между собой, наличия и состояния влаги в материале и других факторов.

Коагуляционные структуры проявляют свойства неньютоновых жидкостей и изменяют свои характеристики при нагревании, наличии поверхностно-активных веществ, изменении кислотности и других воздействиях.

Кристаллизационные структуры обладают повышенной прочностью и упругостью. При нагрузках, превышающих предел прочности, такие структуры разрушаются без восстановления первоначальной формы после снятия нагрузки.

Свойства реальных пищевых материалов отличаются большим разнообразием, что затрудняет их классификацию с реологических позиций, поскольку одни и те же материалы могут быть отнесены к различным группам. Например, пасты и кремы могут рассматриваться как коллоидные системы или как многокомпонентные дисперсии. Реологические свойства у различных видов масел и жиров сильно зависят от тепловых воздействий и находятся в

диапазоне от вязких жидкостей до вязкопластичной среды с определенным значением предела текучести. Например, многие растительные масла ведут себя как ньютоновы жидкости, а различные среды характеризуются отсутствием текучести при небольших сдвиговых напряжениях, что свидетельствует о наличии у них предела текучести.

Понятие течения относится к жидкостям, а деформации к твердым материалам. Материалы, обладающие свойствами одновременно жидких и твердых тел, считаются *вязкоэластичными* или *вязкопластичными*.

Анализ реологических свойств пищевых продуктов показывает, что для них может быть характерно:

- упругое и вязкоупругое поведение;
- наличие предела текучести и др.

Многие пищевые продукты из-за низкой прочности связей начинают проявлять нелинейное поведение при небольших внешних нагрузках и деформациях. Различие свойств пищевых продуктов обусловлено большим разнообразием структур и химического состава.

В зависимости от структуры пищевые продукты делятся на твердые, полутвердые и жидкие.

Для твердых продуктов характерна кристаллическая (поваренная соль) или аморфная структура (карамельные изделия). Капиллярно-пористая коллоидная структура характерна для таких видов продуктов как хлеб, крупа, макаронные изделия, печенье, ткани мяса, рыбы, плодов и овощей, капиллярно-пористую структуру имеет кусковый сахар. Мармелад, желатин - концентрированные студни.

Механические свойства твердых тел непосредственно связаны с их структурой, действующими в них молекулярными силами сцепления и особенностями хаотического теплового движения. Под структурой понимается пространственная сетка, характерная для твердообразных пищевых продуктов, образуемая сцеплением друг с другом атомов, ионов, молекул и коллоидных частиц. Такая структура определяет упругость и прочность продуктов. Она

представляет собой правильную пространственную решетку в кристаллических телах или хаотический каркас в коагуляционных веществах, гелях, студнях и др.

Изучением неупругого поведения тел и течения структурированных жидкостей и твердых тел занимается физико-химическая механика и ее раздел – реология, как наука о деформациях и текучести материалов.

При непрерывном увеличении деформации под действием конечных сил материал течет. Различают вязкое и пластичное течения. Вязкое течение происходит под действием любых сил, скорость деформации уменьшается с уменьшением сил и при снятии нагрузки обращается в ноль. Пластичное течение возникает в том случае, когда силы превышают некоторый предел, называемый *пределом текучести (пределом напряжения сдвига)*.

По характеру поведения и свойствам различают идеальные, реальные и реологические жидкости. При движении реальных жидкостей имеют место силы внутреннего трения в потоке жидкости, т.е. при постоянном напряжении сдвига наблюдается деформация с постоянной скоростью (течение).

Жидкость, у которой коэффициент вязкости есть величина постоянная, называется *ньютоновой жидкостью*. Реологическое уравнение ньютоновой модели связывает напряжение со скоростью деформации, т.е. скорость деформации пропорциональна напряжению сдвига.

Реальные продукты имеют отклонение от ньютоновского поведения, и модель в этом случае не является линейной. Эффективная вязкость неньютоновских жидкостей состоит из двух составляющих: ньютоновской вязкости, обусловленной внутренним течением жидкости и представляющей физическую константу материала и структурного сопротивления, являющегося функцией скорости сдвига. Т.о. эффективная вязкость является реологической характеристикой, учитывающей внутреннее трение и структурно-динамическую компоненту.

Принадлежность реального тела к тому или иному виду реологического тела может быть определена по критерию, показывающему способность

вещества сохранять свою форму и определяемому отношением:

$$K = \tau_0 / \rho g ,$$

где τ_0 – предельное напряжение сдвига, Н/м²;

ρ – плотность продукта, кг/м³;

g – ускорение силы тяжести, м/с².

При $K < 0,005$ – структурные жидкости, $K = 0,005 \dots 0,02$ – жидкие пасты; $K = 0,02 \dots 0,15$ – густые пасты; $K > 0,15$ – твердые тела.

K основным физико-механическим свойствам пищевых продуктов относятся форма, геометрические размеры, масса, плотность (объемная или насыпная) и др.

Форма плодов и овощей – показатель ботанического вида и сорта. Форма хлебобулочных и кондитерских изделий, сычужных сыров характеризует качество сырья и правильность проведения технологического процесса. Для сычужных сыров, колбасных изделий, макарон, яблок, овощей и других продуктов нормируется размер. Например, рыбу по размеру делят на крупную, среднюю, мелкую и т. д.

В партии картофеля ограничивается массовая доля мелких клубней, а для моркови и столовой свеклы не допускаются крупные корнеплоды.

Масса единицы продукции устанавливается при оценке качества многих пищевых продуктов. Масса в килограммах устанавливается при определении размера некоторых рыб, при заготовке и реализации свежей капусты (масса кочана) и т.п. Для злаковых зерен и необжаренного кофе показателем качества является масса 1000 зерен, для орехов – 100 шт., для карамели и конфет регламентируется количество единиц в 1 кг.

Плотность продукта равна отношению массы к единице его объема, измеряемая в кг/м³. В жидких продуктах определяют относительную плотность – безразмерную величину, которую находят делением массы продукта (при 20°С) на массу равного объема дистиллированной воды при той же температуре. По плотности определяют, например, массовую долю сахара в винограде, содержание поваренной соли в рассолах квашеной капусты и

соленых огурцов, крепость спиртных напитков, содержание крахмала в клубнях картофеля (чем больше плотность клубней картофеля, тем больше в них крахмала).

С помощью плотности можно оценить состав жиров в молоке. Например, плотность коровьего молока (1,027 ... 1,031 кг/м³) обусловлена массовой долей жира, белков, углеводов и минеральных веществ и при разбавлении водой плотность его уменьшается.

Объемную или насыпную массу продукта определяют отношением его массы к занимаемому объему вместе с пустотами и порами. Объемную массу продукта необходимо учитывать при определении емкости тары, складских помещений, размещении продуктов для хранения, при выборе транспортных средств при перевозках. Например, объемная масса картофеля составляет 650 – 700 кг/м³, капусты – 350...500, свеклы – 600, лука репчатого – 550...600, зерна пшеницы – 760 кг/м³. Плотность двухкомпонентной смеси при известных плотностях отдельных компонентов и массовой концентрации одного из них определяется следующим образом: находятся объемы отдельных компонентов $\theta_m M / \rho_1$ и $(1 - \theta_m) M / \rho_2$, сумма которых равна объему всей массы двухкомпонентной смеси M / ρ . Отсюда искомая плотность этой смеси будет равна:

$$\rho = \frac{1}{\frac{\theta_m}{\rho_1} + \frac{(1 - \theta_m)}{\rho_2}},$$

где θ_m – массовая концентрация одного из компонентов;

ρ_1, ρ_2 – плотности компонентов.

Важным физическим параметром сыпучих материалов, осадков и др. является их порозность. *Порозностью* сыпучего материала (осадка) называется часть объема, не занятая монолитом, $\varepsilon = \frac{V_0 - V_m}{V_0}$, где V_0 – объем пористого тела, V_m – объем монолита. В сыпучих материалах промежутки между частицами заняты воздухом, в осадках – заполнены жидкостью. Порозность оказывает

влияние на разделение неоднородных систем, на процессы, происходящие в кипящем слое, на процессы смешивания сыпучих частиц и др.

Структурно-механические свойства пищевых продуктов. Эти свойства характеризуют сопротивляемость пищевых продуктов механическому воздействию. Они зависят не только от химического состава, но и от строения (структуры) продукта.

Механические свойства продуктов проявляются в процессе обработки пищевых материалов, когда изменяется форма и размер тел под действием внешних сил. При определении реологических свойств продуктов измеряют количество механической энергии, расходуемой в течение времени обработки на создание в продуктах обратимых (упругих) или остаточных (пластических) деформаций, которые характеризуют силы химических связей между молекулами и элементами структуры материала. Эти данные позволяют судить о скорости протекающих в продуктах химических и биохимических процессов.

Реологические или структурно-механические свойства характеризуют поведение продукта в условиях напряженного состояния и позволяют связать между собой напряжения, деформации и скорости деформации в момент приложения усилий. В зависимости от вида прикладываемых усилий эти свойства могут быть условно разделены на три группы: сдвиговые, объемные и поверхностные.

Сдвиговые свойства характеризуют поведение продукта при воздействии на него касательных напряжений.

Объемные свойства определяют поведение продукта при воздействии на него нормальных напряжений.

Поверхностные свойства характеризуют поведение поверхностного слоя продукта на границе раздела с другим материалом при воздействии нормальных (адгезия) и касательных (внешнее трение) напряжений.

К показателям структурно-механических свойств пищевых продуктов относят прочность, твердость, упругость, пластичность, вязкость и др.

Прочность продукта характеризует его способность сопротивления

механическому разрушению. Данный показатель используется, например, при определении качества макарон, сахара-рафинада, сухарей и других твердых и хрупких продуктов.

Твердость продукта зависит от поверхностного сопротивления тела проникновению в него другого более твердого предмета. Для определения твердости на поверхность продукта воздействуют твердым наконечником, имеющим форму шарика, конуса, пирамиды или иглы и о величине твердости судят по величине отпечатка (глубине проникновения и площади), оставляемого измерительным наконечником на поверхности тела.

Упругость характеризует способность материала мгновенно восстанавливать свою форму после снятия приложенной внешней нагрузки, а *эластичность* – способность восстановления формы через некоторое время. Эти показатели имеют большое значение при определении сроков хранения и условий транспортирования продуктов, а также при определении их некоторых качественных показателей, например, мякиша хлеба, клейковины муки, свежести мяса и рыбы и др.

Пластичность – это свойство продукта, характеризующееся получением необратимых деформаций при определенной величине нагрузки. Ползучестью, например, обладают карамельная масса, тестовые полуфабрикаты и другие продукты. Явление *ползучести* пластичных материалов проявляется в постепенном нарастании деформации без увеличения нагрузки, что характерно для коровьего масла, маргарина, сычужных сыров, мороженого, мармелада, повидла и других кондитерских изделий.

Релаксация – это свойство продуктов твердожидкой структуры, характеризующее время перехода упругих деформации в пластические при постоянной нагрузке. Определенной величиной релаксации обладают, например, сыр, творог, мышечная ткань, мясной фарш.

Поскольку многие пищевые продукты являются многокомпонентными, то каждому из компонентов присуще свое значение времени релаксации. Т.е., функциональным продуктам свойственна как упругая деформация, которая

исчезает после снятия нагрузки, так и запаздывающая упругая деформация, для исчезновения которой требуется некоторое время, а также пластическая деформация. Полная деформация материального тела будет представлять суперпозицию этих деформаций.

Вязкость характеризует внутреннее трение, возникающее при относительном движении слоев жидких продуктов, таких как сиропы, патока, мед, майонез, соки, растительные масла и другие жидкости.

При взаимном движении слоев при деформации сдвига вязкость определяет связь между напряжениями и скоростью деформации. При ламинарном течении многих жидких пищевых продуктов применим закон внутреннего трения Ньютона, согласно которому напряжение сдвига между соседними слоями пропорционально градиенту скорости $\tau = \eta \frac{\partial v}{\partial y}$, где τ направлено перпендикулярно к направлению потока. Коэффициент пропорциональности η называется *динамической вязкостью*, являющейся постоянной величиной при данной температуре и давлении. Обратная величина вязкости φ называется *текучестью*.

Адгезия (липкость) – это способность продуктов проявлять в различной степени силы взаимодействия (связи) с другим продуктом или с поверхностью тары, в которой находится данный продукт. Свойствами липкости обладают многие пищевые продукты: сливочное масло, сыр, мясной фарш, вареные колбасы, ирис и пр., что нужно учитывать при конструировании рабочих органов машин и назначении технологических режимов обработки. Если, отрыв продукта от рабочего органа происходит на границе контакта, то такой отрыв называют *адгезионным*, если по слою продукта – *когезионным*, а также смешанным или адгезионно-кагезионным.

Для характеристики структурно-механических свойств пищевых продуктов применяют термин «консистенция». Под *консистенцией* в данном случае понимают комплексный показатель органолептической оценки продукта, характеризуемый совокупностью свойств, таких как вязкость

продукта, его липкость, эластичность и пр.

Оптические свойства пищевых продуктов. К оптическим свойствам продуктов относятся прозрачность, цветность, рефракция и оптическая активность. *Прозрачность* характеризуется способностью продукта пропускать свет. Прозрачность, как показатель оценки, характерна для ликероводочных изделий, пива, минеральных вод, рафинированных растительных масел, столовых виноградных вин, шампанского.

Цвет пищевых продуктов обусловлен естественными красящими веществами (пигментами) или добавлением искусственных красителей. Он должен соответствовать виду товара и быть однородным по всей массе. При тепловой обработке цвет продуктов изменяется.

По способности преломления луча света судят о качестве некоторых продуктов и количественном составе отдельных его частей, например, массовой доле сухих веществ в томатопродуктах, соках, кофе и др.

По *оптической активности*, т. е. способности вращения плоскости поляризованного луча света, судят о видах сахаров и их количестве в растворе. К оптически активным материалам относятся крахмал, гликоген, сахар, амины, некоторые кислоты и другие вещества.

Теплофизические свойства пищевых продуктов. Теплофизические свойства продуктов выявляются при действии на них тепловой энергии. Эти свойства характеризуются теплоемкостью, теплопроводностью, температурой плавления, затвердевания, замерзания. Знание теплофизических характеристик пищевых материалов необходимо для обеспечения качества готовой продукции при тепловой обработке сырья и полуфабрикатов: варке, выпечке, пастеризации, стерилизации, замораживании, размораживании и т.п.

Качество многих продуктов определяется скоростью их охлаждения в начале хранения. *Теплоемкость* – количество тепла, поглощенное телом при нагревании на 1 °С. Она характеризует способность материала аккумулировать в себе тепловую энергию. Теплоемкость, рассчитанная на 1 кг продукта, называется удельной теплоемкостью и выражается в Дж/(кг·град). Она зависит

от химического состава, структуры, биологических особенностей и других внешних причин. Низкой теплоемкостью отличаются продукты с большой массовой долей жира.

Коэффициентом теплопроводности называется количество тепловой энергии, которая протекает через 1 м^2 поверхности продукта на толщину 1 м при разнице температур в 1°C за единицу времени. Эта величина характеризует способность тел проводить сквозь себя тепло. Вода и продукты с большим содержанием влаги отличаются большей теплопроводностью, чем жиросодержащие, пористые и сыпучие продукты.

Продукты с высокой теплопроводностью имеют большую скорость нагрева и охлаждения. Температура плавления жиров несколько выше температуры затвердевания. Эти характеристики используются при изучении состава и качества жиров.

Температура замерзания продукта должна учитываться при охлаждении, замораживании и хранении продуктов. Хранение при температуре ниже точки замерзания отрицательно сказывается на качестве молочных продуктов, вин и других напитков.

Сорбционные свойства пищевых продуктов проявляются в гигроскопичности, т.е. в способности продукта сорбировать влагу из окружающей среды. Этот показатель зависит от пористости тела и в большей мере от свойств того или иного продукта. Поглощать влагу способны сухие и относительно сухие продукты, такие как сухое молоко, сахарный песок, сухофрукты, чай, кофе и др.

Массовая доля гигроскопичной влаги в продукте зависит от его химического состава, а также от относительной влажности воздуха, которую измеряют психрометром или гигрографом.

Относительная влажность воздуха, выражаемая в процентах, определяется отношением абсолютного количества влаги в воздухе к количеству воды при наибольшем насыщении для данной температуры.

Пищевые материалы с учетом их реологического поведения под

действием внешних факторов могут быть разделены на следующие виды:

Твердые тела:

- абсолютно твердые тела;
- упругие твердые тела с линейным поведением, у которых напряжение пропорционально деформации;
- упругие тела с нелинейным поведением, у которых коэффициент пропорциональности между напряжением и деформацией является функцией этой деформации;
- вязкие твердые тела.

Вязкоупругие тела:

- идеальные жидкости;
- вязкие жидкости с линейным поведением, у которых напряжение пропорционально скорости деформации;
- вязкие жидкости с нелинейным поведением, у которых коэффициент пропорциональности между напряжением и скоростью деформации является функцией времени и скорости деформации.

Реологическое поведение упругих твердых материалов характеризуется двумя свойствами – *упругостью* и *пластичностью*. *Пластичность* твердого материала – это его возможность течения при определенных условиях деформации. Упругие твердые тела обладают способностью к *упругим обратимым деформациям*, т.е. восстановлению своей первоначальной формы после снятия нагрузки без каких-либо временных задержек. Накапливая энергию от работы внешних сил, затрачиваемых на деформацию, тело после прекращения действия сил высвобождает эту энергию и направляет ее сразу же на восстановление формы. При временных задержках, что свидетельствует о вязких потерях части упругой деформации, материал будет относиться к *вязкоупругим телам*.

Для линейных упругих материалов закон Гука при одноосной деформации растяжения:

$$\sigma = E\varepsilon = \frac{\varepsilon}{J},$$

где σ – нормальное напряжение;

E – модуль упругости;

ε – деформация растяжения;

$J = \frac{1}{E}$ – *упругая податливость* – величина обратная модулю упругости

материала.

Аналогичная линейная зависимость наблюдается при простом сдвиге, когда касательные напряжения пропорциональны деформации сдвига:

$$\tau = G\gamma,$$

где τ – касательное напряжение;

G – модуль упругости при сдвиге (модуль сдвига);

γ – величина сдвига.

Линейная зависимость при гидростатическом сжатии:

$$p = -K\varepsilon_v,$$

где K – объемный модуль сжимаемости;

ε_v – объемная относительная деформация.

Таким образом, для описания напряженного состояния линейных упругих (изотропных) материалов нужно знать значения двух из приведенных выше констант: E – модуль упругости (модуль Юнга), ν – отношение Пуассона, G – модуль упругости сдвига, K – объемный модуль сжимаемости.

Многие реальные пищевые продукты обладают анизотропными свойствами, которые в зависимости от направления проведенных измерений будут отличаться друг от друга. Характерным примером анизотропии являются мясные продукты, содержащие в своей структуре мышечные волокна.

Рассмотрим для иллюстрации числовой пример одноосного растяжения пласта теста при его раскатывании в однозонной тестораскатывающей машине.

Пример. Пусть на раскатываемый пласт теста, находящийся между двумя парами вращающихся с разными скоростями валков, действует сила

растяжения пласта, равная 1 Н. Толщина пласта - 2 мм, ширина пласта равна рабочей ширине вала - 200 мм. Площадь поперечного сечения пласта составляет 400 мм^2 . Модуль упругости теста $E = 0,57 \cdot 10^4 \text{ Па}$.

Деформация пласта при соблюдении условия пропорциональности деформации и напряжения составит $\varepsilon = (\sigma_1 / E)100 = 44\%$.

Характерная зависимость нормального напряжения от деформации растяжения для упругих материалов приведена на рис. 2.1. Участок *OA* кривой соответствует линейным упругим деформациям в соответствии с законом Гука. Ордината точки *A* характеризует величину *предела пропорциональности* материала. Следующая точка *B* соответствует *пределу упругости*, после этой точки возникают необратимые деформации - участок *BC* соответствует области пластических деформаций. Максимальное напряжение в области пластических деформаций называется *пределом текучести*. В точке *D* материал разрушается, данная точка называется *пределом прочности* материала.

Различные упругие материалы при растяжении, а также сдвиге или сжатии могут или хрупко разрушаться около точки *B* или переходить от упругих к пластическим деформациям.

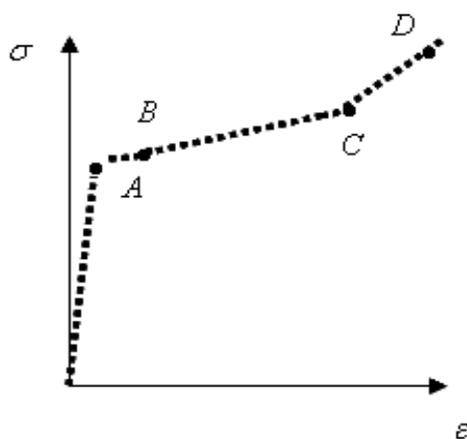


Рис. 2.1. Характерная кривая зависимости нормального напряжения от деформации растяжения для твердого упругого материала

Реологическое поведение для подавляющего большинства пищевых продуктов как твердых линейных упругих тел не характерно.

С позиций реологии пластичность твердых материалов может рассматриваться как аналог вязкопластического поведения жидкостей, и в данном аспекте эти материалы могут быть рассмотрены как упругопластичные среды.

Считают, что материал переходит в пластическое состояние при определенной величине касательного напряжения, которое при одноосном растяжении равно $\tau_{\max} = 0,5\sigma$.

Вязкоупругие пищевые продукты. Некоторые пищевые продукты, например, сыры, отдельные виды теста и др. проявляют пластичность, характерную для твердых тел, и вязкость, как у жидких продуктов.

У упругопластичных материалов, следующих линейному закону между напряжением и деформацией отношение между ними, зависит только от времени, у материалов с нелинейной зависимостью это отношение зависит, кроме того, и от величины напряжения.

Нелинейность вязкоупругих свойств означает отсутствие пропорциональности между напряжением и деформацией, т.е. между силовым воздействием на обрабатываемый материал и немедленным ответом на это воздействие. Нелинейное проявление вязкоупругих свойств может быть вызвано разными причинами, например, особенностями деформирования, приводящими к изменению структуры материала в зонах обработки машин, величиной деформации, влиянием температуры и др. Количественная оценка нелинейных эффектов при деформировании различных продуктов зависит от конкретного вида продукта и условий его деформирования и определяется экспериментальным путем. При оценке нелинейности исходят из того, что напряженное состояние в любой момент времени зависит условий деформирования, которые были в прошлом, и что соотношения между напряжениями и деформациями будут эквивалентны для всех материальных точек изотропной среды.

Упругопластичные (или вязкоупругие) свойства материалов исследуют на *ползучесть* или на *релаксацию напряжений*.

Типичная кривая ползучести показана на рис. 2.2.

Медленное увеличение деформации во времени называется *ползучестью*, а ее отношение к постоянному напряжению называется *модулем ползучести* $J(t) = \gamma / \tau$.

Кривая, соответствующая начальному периоду деформирования вязкоупругого тела, характеризует переходный режим (до момента t_0). Прямой участок соответствует установившейся деформации на интервале времени $t_i - t_0$. В точке, соответствующей снятию нагрузки полная деформация состоит из двух частей: упругой деформации γ_r и остаточной деформации γ_∞ .

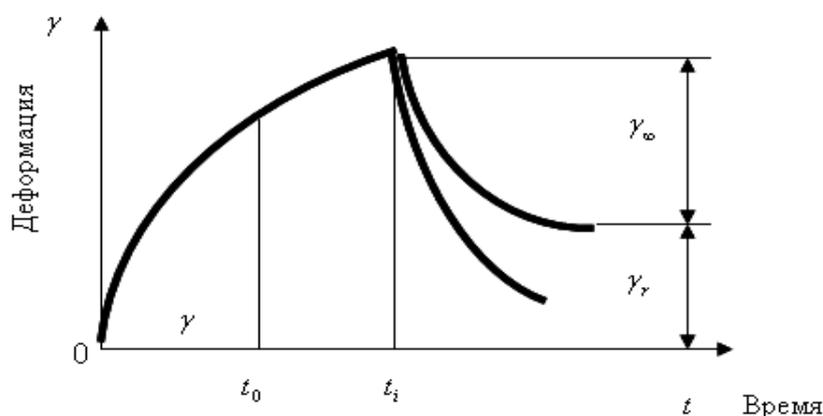


Рис.2.2. Кривая ползучести

Различие между вязкоупругим твердым телом и вязкоупругой жидкостью при ползучести заключается в том, что для твердого тела необратимые деформации отсутствуют, а жидкость подвержена течению.

Если телу сообщить деформацию и зафиксировать ее на постоянном уровне, то со временем в материале будет наблюдаться уменьшение напряжений. Такое реологическое поведение материала называется *релаксацией (ослаблением) напряжений*. Время, которое необходимо для снижения неупругой деформации в k раз, составляет период релаксации. Величина периода релаксации зависит от отношения коэффициента вязкости к модулю сдвига.

В пищевых продуктах, содержащих белки, деформация изменяется в широких временных диапазонах, что обусловлено цепным строением

макромолекул.

В жидкостях напряжения релаксируют от начального значения до нуля, в твердых телах уменьшаются до какой-то остаточной величины, называемой остаточным или равновесным напряжением.

Пищевые продукты, в зависимости от состава и дисперсного строения обладают различными реологическими свойствами. Наиболее сложными реологическими свойствами обладают высококонцентрированные дисперсные системы с пространственными структурами, образование и изменение которых обусловлено физико-химическими, коллоидно-химическими и другими процессами, приводящими к изменению этих свойств.

Поведение реальных пищевых продуктов определяется различным сочетанием упругих, пластичных и вязкостных свойств материалов, а также характером связи между напряжениями, деформациями и скоростями деформаций.

Одним из принципов классификации является принцип классификации по реологическим свойствам и поведению тел при их деформации (табл.2.1).

Таблица 2.1

Признаки классификации физических тел

Твердые тела			Жидкости		
Идеальное твёрдое тело Эвклида	Упругое тело Гука	Пластическое тело Сен-Венана	Идеальная Паскалева жидкость	Ньютонова жидкость	Неньютонова жидкость
При любых нормальных и касательных напряжениях деформация равна нулю.	Напряжение пропорционально деформации	При достижении предельного напряжения сдвига начинаются пластические деформации	Вязкость и сжимаемость равны нулю	Коэффициент вязкости есть величина постоянная	Коэффициент пропорциональности между напряжением и скоростью деформации является функцией времени и скорости деформации

Внутреннее строение продукта или его структура относится к важнейшим факторам, оказывающим влияние на выбор рациональной технологии обработки растительного и животного сырья при его трансформации в готовую продукцию.

Влагосодержание и форма связи влаги, как и структура, определяет

реологические свойства продукта. По классификации, предложенной Ребиндером, различают три формы связи влаги:

– *химическую*, обусловленную ионно-молекулярными взаимодействиями и удаляемую путем прокаливания материала или проведением соответствующих химических реакций;

– *физико-химическую*, обусловленную адсорбцией или осмотическим удержанием влаги в клетках продукта и удаляемую испарением, десорбцией или за счет разности концентраций. Адсорбционная влага способствует пластификации систем и характерна для коагуляционных структур. Осмотическая влага ведет к набуханию материала и присуща дисперсным клеточным структурам;

– *физико-механическую*, характеризующуюся удержанием влаги в микро и макрокапиллярах структуры и удаляемую испарением или различными механическими способами (центрифугованием, отжимом и пр.).

В зависимости от формы связи влаги пищевые продукты делятся на *коллоидные* (золи, гели), *капиллярно-пористые* с физико-механической формой связи и *коллоидные капиллярно-пористые* (мясной фарш, творог и др.).

Известен принцип групповой классификации состояний веществ по величинам констант – модулям упругости, вязкости и др. Так, по Николаеву Б.А. к первой группе относятся твердые и твердообразные материалы (твердый жир, сухари, печенье и др.), ко второй группе – твердожидкие тела (тесто, фарш, студни и др.), к третьей группе – жидкообразные тела и жидкости (молоко, патока, мед, вода и пр.).

Феноменологический способ классификации на основе математических моделей полагает, что если взять упругое и истинно вязкое тело в качестве крайних, то все остальные тела, будут располагаться между ними.

Следующий принцип классификации продуктов также по их реологическим свойствам предложен Ребиндером, который делит продукты на две группы (жидкообразные и твердообразные) в зависимости от поведения кривой эффективной или кажущейся вязкости η и периода релаксации. К

жидкообразным телам по его классификации относятся ньютоновы жидкости и структурированные системы, не имеющие статического напряжения сдвига, к твердообразным телам – упруго-пластичные и другие тела.

Зависимость эффективной вязкости от напряжения или скорости сдвига считают основной характеристикой структурно-механических свойств дисперсных систем, так как эффективная вязкость является итоговой характеристикой, описывающей равновесное состояние между процессами восстановления и разрушения структуры в установленном потоке.

Целесообразно классифицировать дисперсные системы на твердо- и жидкообразные по характеру изменения эффективной вязкости с увеличением градиента скорости. Существенный интерес представляют продукты, характеристики которых зависят от длительности воздействия напряжения.

Учет поведения и знание структурно-механических свойств пищевых материалов при различных воздействиях со стороны рабочих органов является необходимым условием получения рациональных конструкций машин и аппаратов. Под действием рабочих органов происходят деформации обрабатываемого материала, проявляющего различные свойства в разные моменты времени. Это могут быть упругие или пластические свойства, может наблюдаться текучесть материала, фазовые превращения и др.

2.2. Процесс измельчения пищевого сырья. Технологическое оборудование для измельчения пищевых масс

Сущность процесса измельчения заключается в изменении объемной первоначальной массы пищевых материалов путем деления на более мелкие составляющие. Процесс измельчения условно подразделяется на дробление – крупное, среднее и мелкое, и измельчение – тонкое и сверхтонкое.

В пищевых технологиях преимущественно используются следующие способы воздействия на твердые материалы при их измельчении:

- раскалывание и раздавливание;
- резание и истирание;

– излом и ударное воздействие.

На рис. 2.3 показаны принципиальные схемы способов измельчения твердых материалов.

В большинстве случаев эти способы измельчения в технологическом оборудовании используются комбинированно.

Рассмотрим процесс измельчения в молотковой дробилке, в которой реализуется способ ударного измельчения твердых пищевых материалов. При воздействии вращающихся рабочих органов машины (молотков) на поступающий и движущийся в зоне измельчения поток материала, состоящий из дискретных единиц продукта, происходит разрушение исходной структуры этих единиц, например, целых зерен пшеницы и пр., на составные части с одновременным изменением плотности исходной массы.

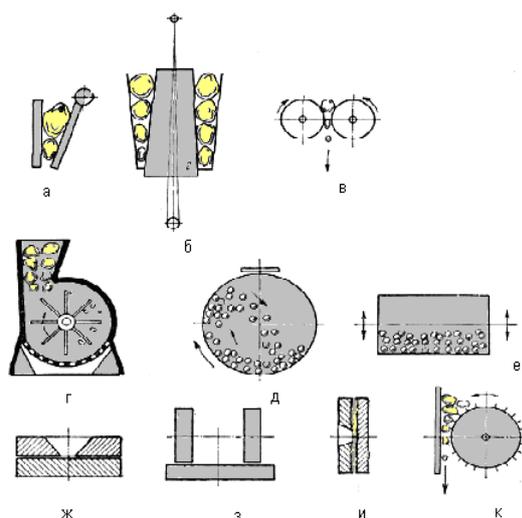


Рис. 2.3. Принципиальные схемы измельчения твердых материалов:
 а – щековая дробилка, б – конусная дробилка, в – вальцовая дробилка, г – молотковая мельница, д – шаровая мельница, е – вибрационная шаровая мельница, ж – жернова, з – бегуны, и – дисковая мельница, к – терка

Анализ показывает, что ударное воздействие на единичную структуру может быть трех видов:

- удар вращающегося рабочего органа измельчителя по свободно движущимся единицам потока продукта (рис. 2.4а);
- удар отдельных единиц продукта о неподвижные поверхности рабочей зоны измельчителя (поверхность деки и т.п.) (рис. 2.4б);
- удар рабочего органа измельчителя по неподвижной единице продукта,

зафиксированной между вращающимся органом и неподвижной поверхностью (рис. 2.4 в).

1 случай. При ударе вращающегося органа по свободно движущейся частице можно записать следующие уравнения движения:

- для ударяющего органа $I(\omega - \omega_0) = -\tilde{J}r$;
- для единицы измельчаемого продукта $mv + mv_0 = J$.

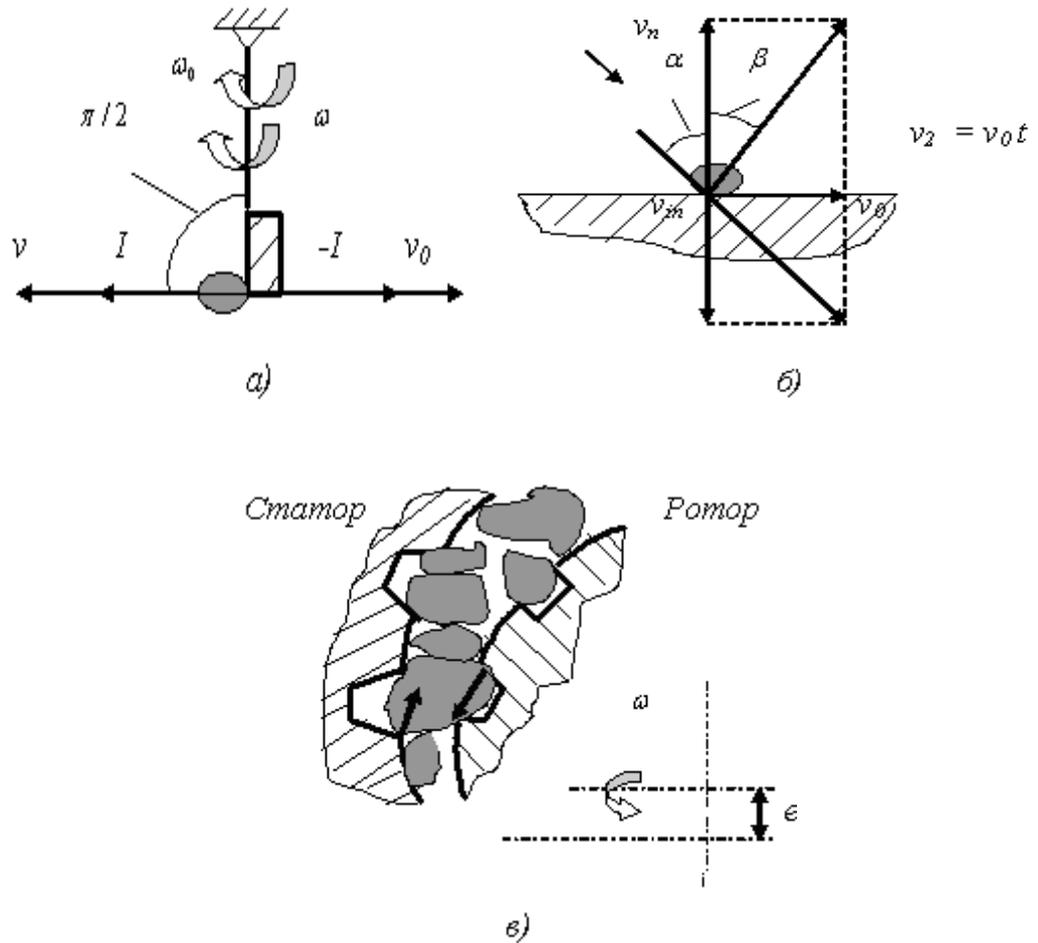


Рис. 2.4. Схемы ударных воздействий при измельчении твердых материалов:

Поскольку реальный продукт не является абсолютно упругим телом, то коэффициент восстановления материала можно выразить как:

$$k = \frac{v - \omega r}{\omega_0 r + v_0}, \quad 0 \leq k \leq 1,$$

где I – момент инерции рабочего органа;

ω_0, ω – угловая скорость рабочего органа до удара и после удара

соответственно;

v_0, v – скорость единицы продукта до удара и после удара соответственно;

J – импульс ударного воздействия;

r – расстояние точки удара от оси вращения органа;

m – средняя масса единицы продукта;

k – коэффициент восстановления материала продукта после удара.

Из данных уравнений определяются неизвестные параметры, характеризующие процесс измельчения твердого материала:

$$J = \frac{m(1+k)(v_0 + rv_0)}{(1 + mr^2 / I)} = m\lambda / \mu;$$

$$v = \frac{(1+k)(v_0 + rv_0)}{(1 + mr^2 / I) - v_0} = \lambda / (\mu - v_0);$$

$$\omega = \frac{\lambda}{r\mu - \frac{v_0}{r}(1+k) - k\omega_0}.$$

2 случай. При ударе единицы материала о неподвижную поверхность зоны измельчения под углом α к поверхности скорость отражения единицы продукта может быть выражена через скорость падения $v_{OT} \sin \beta = v_n \sin \alpha$, где β – угол отражения частицы материала. Так как $k = \tan \alpha / \tan \beta$, то $v_n = v_{OT} \cos \alpha \sqrt{k^2 + \tan^2 \alpha} = v_{OT} k \frac{\cos \alpha}{\cos \beta}$. Импульс силы удара в этом случае равен

$$J = m(1+k)v_n \cos \alpha.$$

3 случай. Импульс силы удара, распространенный на всю единицу продукта, равен приращению количества движения mv за время действия этого импульса. При ударе вращающегося рабочего органа по зажатой частице продукта последняя начнет деформироваться и в дальнейшем разрушаться. Можно записать:

$$\tilde{I} = mv_1,$$

где v_1 – скорость рабочего органа.

Работа, затрачиваемая на дробление, расходуется на деформацию

материала и образование новых поверхностей. Полная работа внешних сил при дроблении выражается уравнением П.А.Ребиндера:

$$A = K + \frac{G_p^2 V}{2E} m_y + K_R \Delta S \alpha, \text{ [Дж]},$$

где K – энергия, идущая на деформацию;

G_p – напряжение, возникающее в материале;

V – объем измельчаемого материала;

E – модуль упругости материала;

m_y – число циклов деформации частиц материала;

K_R – энергия, расходуемая на образование 1 м² новой поверхности;

ΔS – вновь образуемая поверхность;

α – коэффициент, характеризующий образование новой поверхности.

При ударных воздействиях интенсивность процесса измельчения продукта может быть охарактеризована степенью измельчения, т.е. числом ударов, приходящихся на единицу продукта:

$$S_{uz} = \frac{N n_p 1000}{v_{под} \rho_H},$$

где N – число измельчающих элементов на роторе измельчителя

n_p – частота вращения ротора,

ρ – насыпная плотность подаваемого слоя продукта.

Суммарный импульс, приходящийся на 1 г массы обрабатываемого материала:

$$\tilde{I}_c = \frac{\pi m N D_p n_p^2 1000}{v_{под} \rho_H},$$

где m – масса единицы измельчаемого продукта,

D_p – диаметр ротора.

О степени измельчения можно судить по величине следующих показателей:

средней массе единицы измельченного готового продукта;

среднему числу единиц продукта в 1 г измельченного материала;

среднему диаметру по миделю единиц измельченного материала.

Теоретические и экспериментальные исследования измельчающего оборудования проводятся с целью определения интенсивности воздействия рабочих органов, эффективности процесса измельчения, определения режимов работы, а также для определения наиболее рациональной формы и размеров рабочих органов.

При теоретических исследованиях процесса измельчения осуществляют построение математической модели процесса, проводят анализ взаимодействия рабочих органов с перерабатываемым материалом при статических и динамических условиях, рассматривают условия равновесия сил и моментов, количество движения, импульс ударного воздействия и т.д.

При экспериментальных исследованиях проводятся технологические эксперименты по оценке эффективности процесса измельчения и интенсивности воздействия рабочих органов на перерабатываемый материал.

В зависимости от конструктивного исполнения различают щековые, конусные, валковые и молотковые дробилки, дезинтеграторы и дисмембраторы, барабанные, кольцевые, штифтовые, шаровые, вибрационные и струйные мельницы.

На пищевых предприятиях большое распространение получили молотковые дробилки ударного действия, на которых получают высокодисперсную смесь измельченных частиц (рис. 2.5). Эти дробилки эффективны при измельчении зерна, соли, сахара-песка.

Процесс измельчения в рабочей зоне машины происходит в результате

ударов молотков ротора, ударов частиц продукта о кожух дробилки и истирания их о сито.

Молотковая дробилка устроена следующим образом: в корпусе установлен вал, на левом конце которого закреплен ротор с молотками, в средней части – крыльчатка вентилятора и на правом конце – шкив клиноременной передачи. В нижней части корпуса закреплено сито и неподвижная дека. Измельчаемый продукт поступает в рабочую зону через приемный бункер с регулируемой задвижкой. Для улавливания ферромагнитных частиц в бункере смонтирован магнитный металлоуловитель на постоянных магнитах.

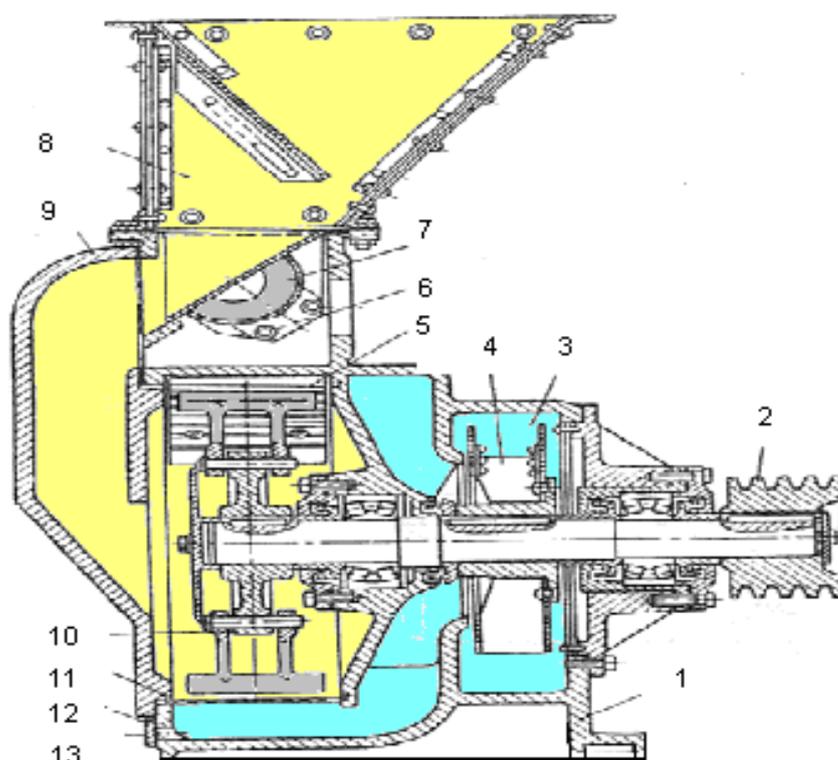


Рис. 2.5. Молотковая дробилка:

1 – корпус, 2 – шкив, 3 – камера вентилятора, 4 – крыльчатка вентилятора, 5 – дека, 6 – металлоуловитель, 7 – постоянные магниты, 8 – бункер, 9 – крышка, 10 – ротор, 11 – сито, 12 – планка, 13 – щель подачи воздуха

Производительность молотковой дробилки:

$$P = k_1 \rho_n D^2 L \omega,$$

где k_1 – эмпирический коэффициент, зависящий от типа и размера ячеек ситовой поверхности;

ρ_n – плотность продукта;

D, L – диаметр и длина ротора соответственно; ω – частота вращения ротора.

Толщина ротора:

$$H \geq \frac{F}{d[\sigma]_c},$$

где F – центробежная сила инерции молотков;

d – диаметр оси подвеса молотка;

$[\sigma]_c$ – допустимое напряжение сжатия материала молотка.

Мощность двигателя привода:

$$N = k_1 k_2 \rho_n D^2 L \omega,$$

где k_2 – эмпирический коэффициент, учитывающий степень измельчения продукта.

На рис. 2.6. приведена конструкция зоны измельчения компактной мельницы для тонкого измельчения твердых сыпучих пищевых материалов. Рабочим органом данной мельницы является оригинальная конструкция ножа, содержащая горизонтальные и вертикальные режущие лезвия, соединенные в общую рамку.

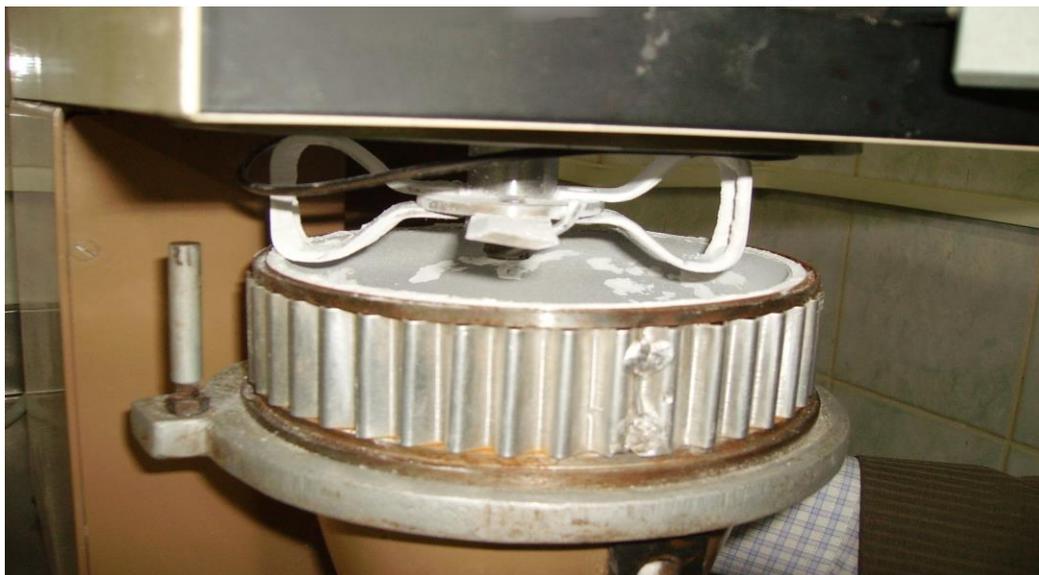


Рис. 2.6. Зона измельчения мельницы для тонкого измельчения сыпучих материалов

Вальцовые дробилки широко применяются в пищевых производствах для

дробления и помола зерна, солода, плодов и др. Рабочими органами валковой дробилки являются горизонтально установленные валки. На рис. 2.7 приведена схема взаимодействия валков и куска материала.

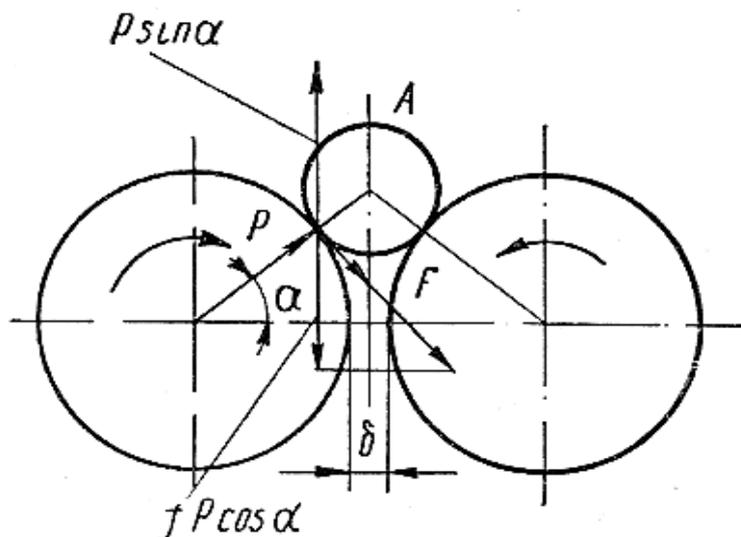


Рис. 2.7. Схема взаимодействия измельчаемого куска материала А с валками дробилки

Рассмотрим условия, при которых кусок попадает в створ валков. Со стороны куска на валок в направлении его центра действует сила P , обусловленная его массой, а со стороны валка – равная ей реакция, которая раскладывается на две составляющие. Направленная вверх составляющая силы $P \sin \alpha$ выталкивает кусок кверху. Аналогичная составляющая будет действовать со стороны второго валка, т.е. выталкивающая сила будет равна $2P \sin \alpha$. В точке контакта куска с валком возникает также сила трения $2fP$, проекция которой $2fP \cos \alpha$ будет направлена вниз. Чтобы кусок был затянут в створ валков, должно соблюдаться очевидное условие $2P \sin \alpha < 2fP \cos \alpha$.

На практике гладкие валки для дробления зерна имеют диаметр 250...350 мм. При одинаковой скорости валков материал будет раздавливаться, чтобы одновременно с раздавливанием происходило истирание, скорость валков устанавливают разной, с соотношением 1/1,3...1/2,5. Окружная скорость вращения валков при дроблении зерна составляет 2,5...5 м/сек.

Производительность вальцово-валковой дробилки:

$$P = 60 \cdot ksl \cdot \pi D n \rho, \text{ кг/ч,}$$

где l – длина валка;

s – расстояние между валками (ширина створа);

D – диаметр валка;

n – число оборотов валков;

k – коэффициент, учитывающий неравномерность подачи материала;

ρ – плотность материала.

Для тонкого помола пищевого сырья используются *шаровые мельницы*, дробление в которых происходит вследствие удара и истирания продукта между поверхностями шаров, перемещающихся в корпусе дробилки..

При вращении корпуса шары прижимаются к стенкам под действием центробежной силы, равной:

$$F_c = m\omega^2 r = m \left(\frac{\pi n}{30} \right)^2 r,$$

где m – масса шара;

r – радиус вращения шара;

n – число оборотов корпуса дробилки.

Для того чтобы шар начал перемещаться в корпусе и воздействовать на материал должно выполняться условие $F_c < G$, где G – вес шара. Исходя из этого условия, число оборотов корпуса шаровой мельницы должно быть $n < 42,4/\sqrt{D}$. На практике принимают $n \approx 32/\sqrt{D}$.

Шары имеют диаметр 35...175 мм в зависимости от размеров измельчаемого материала. Корпус заполняется шарами на 30...35% его объема.

На рис. 2.8 приведен общий вид шаровой мельницы для измельчения какао-тертое.

Процесс измельчения пищевых продуктов *резанием* может быть реализован с помощью одно-, двух- или многолезвийных исполнительных органов. Сущность резания заключается в перемещении (вращении или возвратно-поступательном прямолинейном движении) режущего инструмента относительно обрабатываемого продукта. С помощью резания получают материал определенной формы (стружка, ломтики, кубики, брусочки и пр.).



Рис. 2.8. Общий вид шаровой мельницы

Различают резание, когда лезвие режущего инструмента перемещается только в вертикальной плоскости перпендикулярно к материалу и когда лезвие кроме вертикального движения совершает возвратно-поступательное движение в горизонтальной плоскости. В последнем случае срез продукта получается более ровным и гладким.

Производительность дисковых овощерезательных машин при принудительной подаче продукта, кг/с.

$$P = F v k \rho ,$$

где F – площадь сечения потока продукта, м²;

v – скорость потока, м/с;

k – коэффициент, учитывающий отклонение от расчетной производительности;

ρ – плотность продукта, кг/м³.

Мощность двигателя резательных машин, кВт

$$N = w R m b / \eta c ,$$

где w – удельная работа резания, кДж/м²;

R – режущая способность машины, м²/с;

m – коэффициент использования режущей способности;

$b = 1,25 \dots 1,35$ – коэффициент запаса мощности;

η – к.п.д. привода;

$c = 0,9 \dots 0,95$ – коэффициент, учитывающий расход энергии на подачу и отвод продукта.

Площадь, приходящаяся на разрезание 1 кг продукта, м²:

$$F = (Z S - z s) / 2,$$

где Z, z – число кусочков до и после резания;

S, s – площадь боковой поверхности кусочков до и после резания, м².

Режущая способность ножей многодисковых машин:

$$R = 60 \Sigma h v x,$$

где h – толщина разрезаемого продукта, м;

v – скорость подачи продукта, м/с;

x – число ножей в одной группе.

Режущая способность машин с серповидными ножами:

$$R = 1800 D n \omega / m,$$

где D – площадь слоя продукта, находящегося в желобе или чаше машины, м²;

ω – частота вращения ножей, с⁻¹;

m – число ножей.

Резательная способность машин с плоскими ножами

$$R = a b v / l,$$

где a, b – поперечные размеры обрабатываемого продукта, м;

l – расстояние между ножами, м.

Общий вид дисковой овощерезательной машины с откидным загрузочным устройством приведен на рис. 2.9.



Рис. 2.9. Общий вид дисковой резательной машины

Конструктивное устройство универсальной дисковой машины модели МРО50-200, предназначенной для нарезания сырых овощей ломтиками, брусками, соломкой и для шинкования капусты на предприятиях общественного питания, показано на рис. 2.10.

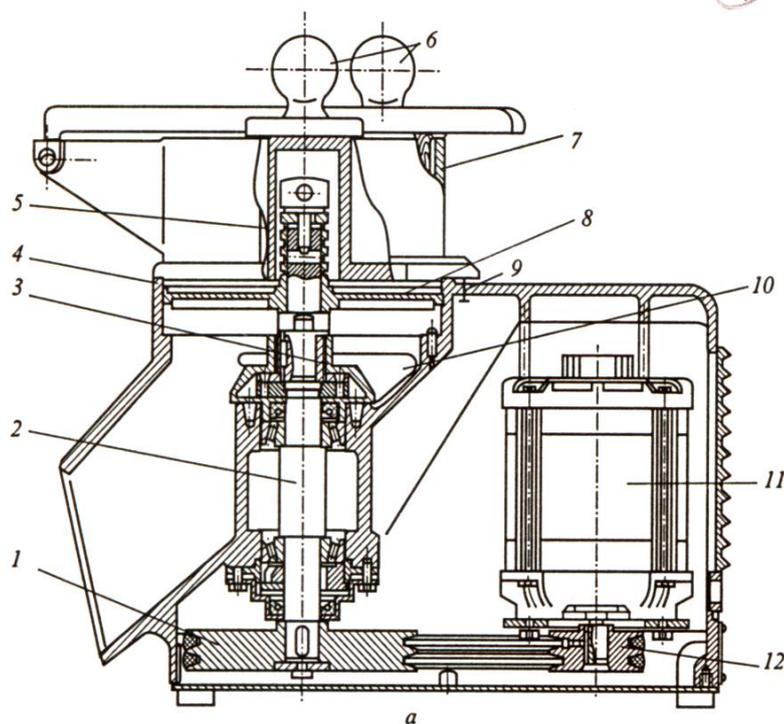


Рис. 2.10. Конструктивное устройство овощерезательной машины модели МРО50-200:
 1 – шкив вертикального вала; 2 – вал вертикальный; 3 – втулка; 4 – корпус;
 5 – крышка; 6 – толкатель; 7 – загрузочное устройство; 8 – режущий диск;
 9 – блокировка; 10 – сбрасыватель; 11 – электродвигатель; 12 – шкив ведущий

Для измельчения мясных продуктов используются волчки, мясорубки и куттеры. На рис. 2.11 показано устройство промышленной мясорубки и ее режущие элементы.

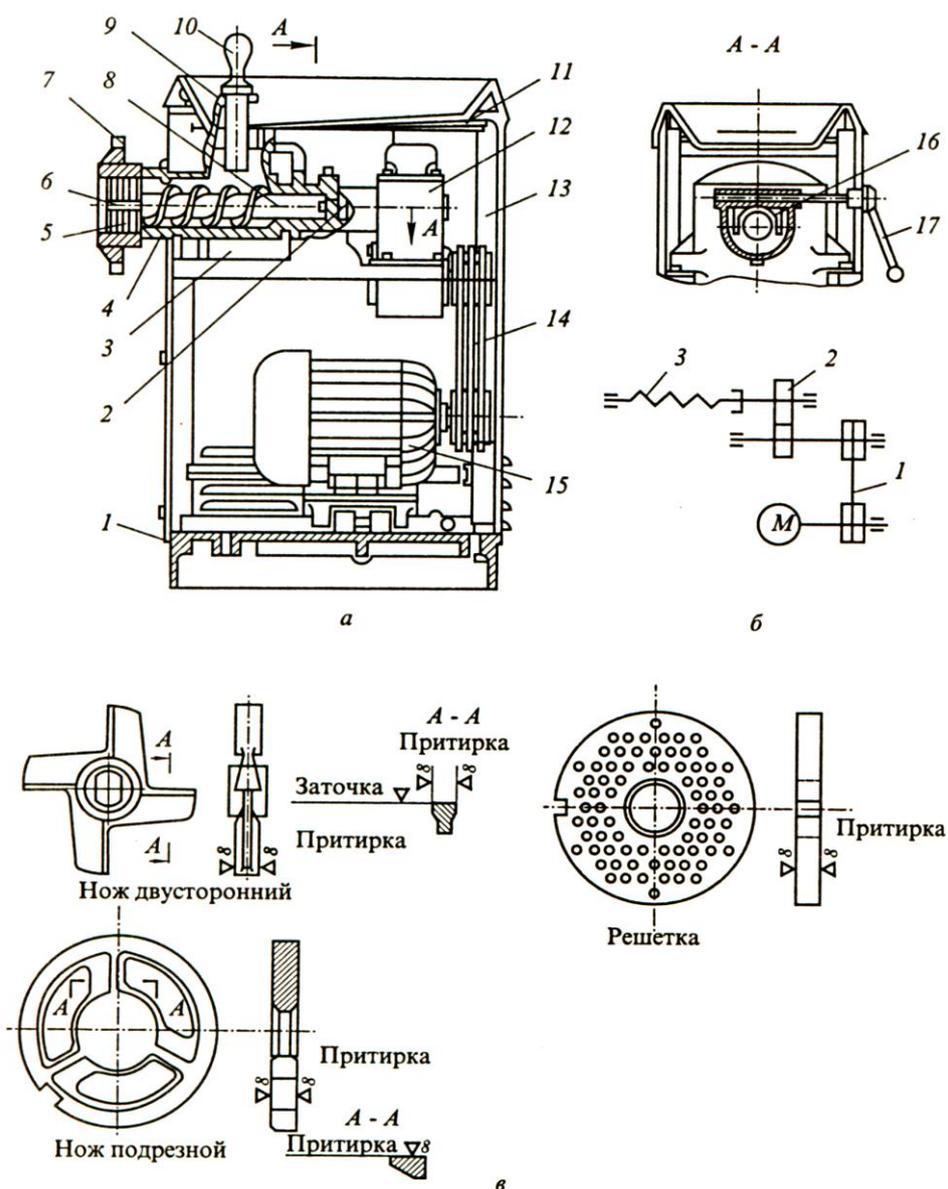


Рис. 2.11. Мясорубка модели МИМ-500:

а – общий вид;

1 – основание; 2 – муфта; 3 – рабочая секция; 4 – корпус; 5 – ножи; 6 – решетка;
7 – гайка; 8 – шнек; 9 – кронштейн; 10 – толкатель; 11 – бункер; 12 – редуктор;

13 – остов; 14 – привод; 15 – электродвигатель;

б – кинематическая схема мясорубки;

1 – клиноременная передача; 2 – редуктор; 3 – шнек;

в – режущие элементы мясорубки

Куттеры преимущественно используются для тонкого измельчения мясного сырья при производстве некоторых сортов колбасных изделий. На рис. 2.12 показана схема куттера периодического действия.

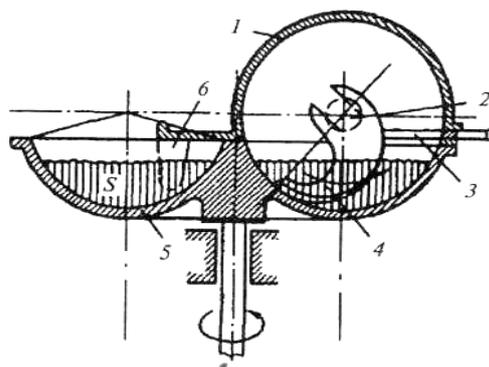


Рис. 2.12 Схема куттера периодического действия
1 – крышка, 2 – вал приводной, 3 – гребенка, 4 – нож серповидный, 5 – чаша, 6 – скребок

На рис. 2.13 и 2.14 показано устройство куттера модели VCM фирмы «Метос» (Финляндия) и виды продукции, получаемой на данном куттере.

Режущая способность ножей волчков:

$$R = (\pi D^2 / 240) n (\varphi_2 k_1 + \varphi_2 k_2 + \dots + \varphi_z k_z)$$

где φ_2 – коэффициент использования площади решетки под отверстия;

D – диаметр решетки, м;

n – частота вращения ножей, об/мин;

k_2 – число лезвий на каждом ноже.

Объемная производительность куттера:

$$P = V / \tau (1 + \tau_0 / \tau)$$

где τ – длительность процесса измельчения, с;

τ_0 – длительность вспомогательных операций, с;

V – объем загружаемого продукта.

Измельчение вязких и пюреобразных продуктов. Получение пюреобразных продуктов может быть осуществлено тремя способами:

- тонкое измельчение с помощью высокочастотных колебаний;
- разрезание продукта кромками сита и продавливание его через ситовые отверстия с помощью лопасти;
- измельчение вращающейся лопастью с одновременным перемешиванием продукта.



Рис. 2.13. Универсальный куттер модели VSM фирмы «Метос» (Финляндия)



Рис. 2.14. Виды продукции, получаемой с помощью куттера

Измельчение вязких и пюреобразных продуктов. Получение пюреобразных продуктов может быть осуществлено тремя способами:

- тонкое измельчение с помощью высокочастотных колебаний;
- разрезание продукта кромками сита и продавливание его через ситовые отверстия с помощью лопасти;
- измельчение вращающейся лопастью с одновременным перемешиванием продукта.

При измельчении продуктов протиранием происходит разделение растительного сырья на две фракции: жидкую с мякотью и твердую,

представляющую собой отходы.

Протира́ние – это процесс отделения массы сырья от косточек, семян, кожуры путем продавливания на ситах с отверстием 0,7...5,0 мм.

Финиши́рование – это тонкое измельчение протертой массы путем пропускания ее через сито с отверстиями менее 0,4 мм.

Протирочное оборудование используется в производстве пюре, соков, концентрированных томатопродуктов и других растительных полуфабрикатов.

Протирочные машины классифицируются по числу барабанов (одинарные, сдвоенные), по принципу действия (бичевые и безбичевые), по форме барабанов (с цилиндрическим или коническим барабаном), по назначению (для семечковых или косточковых плодов), по способу регулирования производительности (с изменяющимся углом опережения бичей, изменяющимся зазором между бичами и барабаном, изменяющейся частотой вращения ротора).

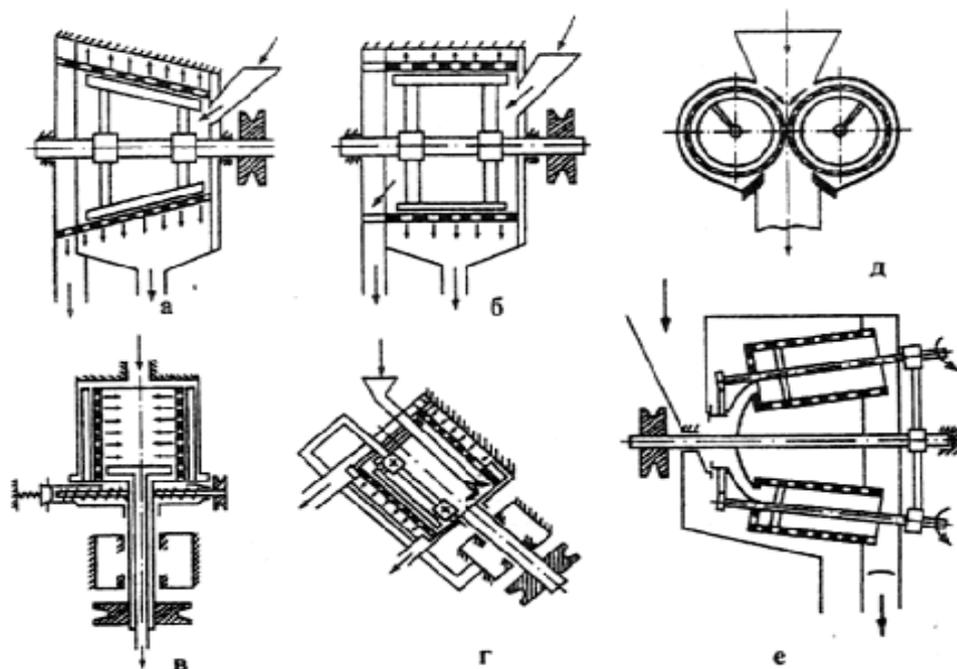


Рис. 2.15. Схемы протирочных машин:

- а – с коническим барабаном; б – с цилиндрическим барабаном; в - с вращающимся вертикальным барабаном; г – с наклонным вращающимся барабаном;
- д – двухбарабанная безбичевая машина; е – трехбарабанная безбичевая машина

Основные конструктивно-технологические схемы протирочных машин приведены на рис. 2.15.

Основными органами протирочных машин является ситчатый барабан, бичевой устройство, устройства загрузки сырья и удаления отходов.

На рис. 2.16 приведен общий вид протирочной машины, служащей для отделения косточек плодов. Машина состоит из корпуса, станины, петельного вала с петлями, бункера и сборника.

Плоды поступают в машину через загрузочный бункер и в полости сита разбиваются петлями петельного вала и отбрасываются на сетку. Жидкая фаза проходит сквозь сито и стекает в сборник. Косточки продвигаются к лотку и по нему сходят в тару.

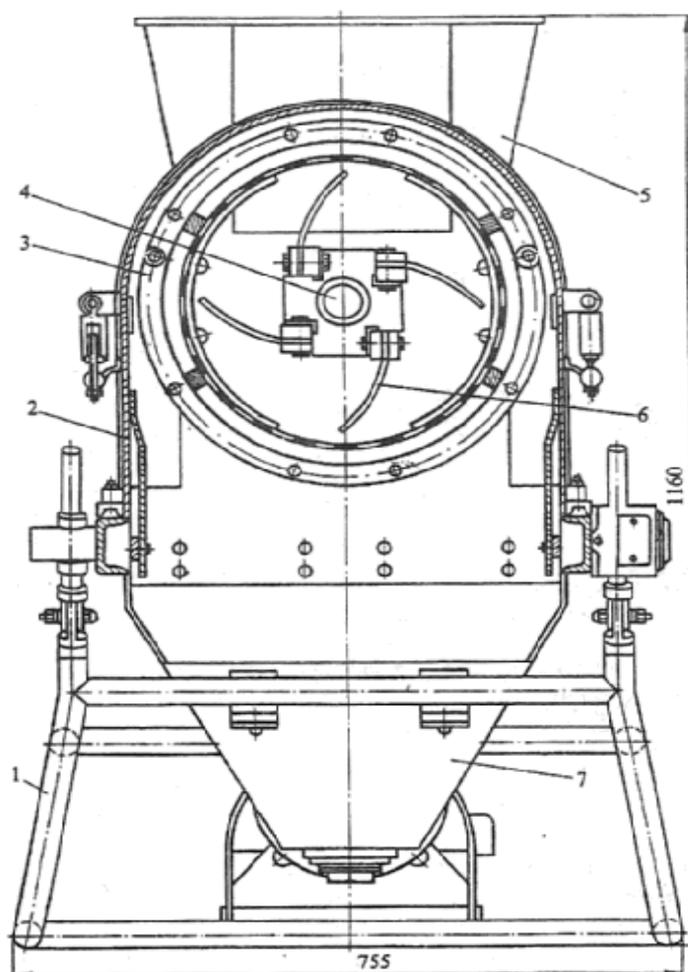


Рис. 2.16. Протирочная машина:
1 – станина; 2 – корпус; 3 – сетка; 4 – петельный вал; 5 – бункер; 6 – петли; 7 – сборник

Угловая скорость вращения вала

$$\omega = \sqrt{Fr \cdot g / R},$$

где $Fr = 200...300$ – фактор разделения;

g – ускорение свободного падения;

R – радиус бичей.

Длина зоны активного отделения жидкой фазы (для томатов)

$$l_1 = R \cdot 30,4q^{0,29} Fr^{-0,53} z^{0,31},$$

где z – число бичей.

Длина зоны центробежного отжима $l_2 = 0,11R$.

Длина ситчатого барабана $l = l_1 + l_2$.

Время пребывания продукта в машине:

$$\tau = L/v_1,$$

где L – длина бича, $L = l$;

$v_1 = 2R\omega \tan \alpha$ – скорость перемещения продукта вдоль бича;

ω – угловая скорость бичевого вала;

α – угол опережения бича.

Мощность привода:

$$N = k(N_1 + N_2 + N_3)/\eta,$$

где k – коэффициент запаса мощности;

$N_i, i=1,2,3$ – мощность на сообщение продукту скорости, мощность, затрачиваемая на трение массы о сито, мощность на измельчение сырья соответственно;

η – КПД привода.

Тенденция развития современного технологического оборудования для пищевых отраслей показывает, что ведущие производители техники уделяют преимущественное внимание созданию многофункционального оборудования, способного выполнять различные процессы по обработке и преобразованию пищевого сырья. Характерным примером может служить серия комби-котлов серии *Viking VM* фирмы «Метос» (Финляндия) с электронагревом (рис. 2.17).



Рис. 2.17. Универсальный комби-котел серии *Viking VM*

Технологические возможности данной конструкции заключаются не только в традиционной варке пищи, но и в взбивании и охлаждении ягодного парфе, замесе и расстойке теста, измельчении и перемешивании рубленого мяса, приготовлении картофельного пюре, взбивании кремовых масс.

2.3. Процесс сортирования сыпучих материалов и оборудование для сортирования

Сущность сортировочного процесса заключается в разделении сыпучих пищевых материалов на фракции, различающиеся качеством частиц (сортирование) и величиной частиц (калибрование), а также в отделении сыпучих продуктов от посторонних примесей.

Основным механическим рабочим органом сортировочного оборудования являются сита, которые по способу изготовления делятся на штампованные и тканые.

Часть сыпучего материала с размерами меньше размеров ячеек сита и проходящих через ситовую поверхность, называется *проходом*, а частицы, не

проходящие сквозь отверстия сита, называются *сходом*.

Дисперсность сыпучей смеси оценивается с помощью ситового анализа, для чего пробу смеси пропускают через ряд сит, отличающихся друг от друга размером отверстий, и определяют количество продукта, находящегося на каждом сите. Далее, откладывая на оси абсцисс размер отверстий сита, а на оси ординат массу фракции, находящейся на сите в процентах от первоначальной пробы, строят кривую дисперсности смеси (рис.2.18).

Для осуществления процесса разделения сыпучего материала необходимо выполнить основное условие просеивания – скольжение частиц продукта по поверхности сита. При этом происходят одновременно две стадии сепарирования:

– самосортирование, заключающееся в перемещении частиц с меньшими размерами и меньшим значением коэффициента трения из верхних слоев в нижние к поверхности сита;

– собственно просеивание частиц, происходящее при относительном движении их по сити.

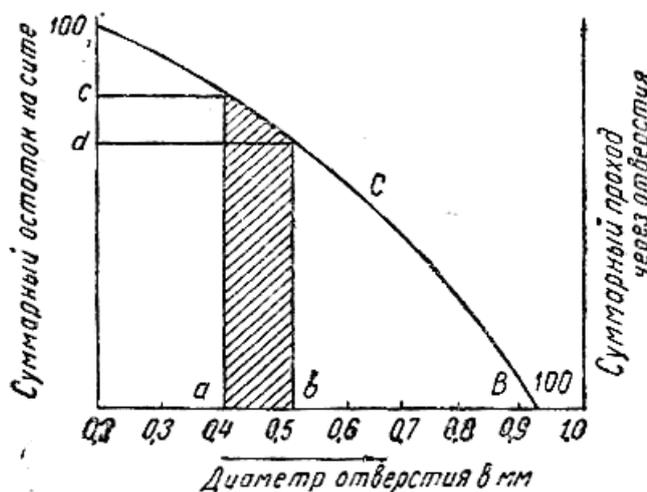


Рис. 2.18 Распределение частиц смеси по крупности при ситовом анализе

Пневмосортирование основано на различии сопротивления, оказываемом отдельными частицами воздушному потоку. В восходящем потоке сила тяжести G и сила сопротивления движению R , действующие на частицу, противоположны по направлению. При $G/R < 1$ частица движется вниз, при

$G/R > 1$ – верх, а при $G/R = 1$ наблюдается процесс витания частиц. Эффективность пневмосортирования зависит от средней скорости воздушного потока, его равномерности, физико-механических свойств смеси, конструктивных особенностей оборудования и других факторов.

Просеивающее оборудование, применяемое в пищевой промышленности, классифицируется на следующие виды:

- по конструкции ситовой поверхности (плоские и барабанные сита);
- по способу получения движения продуктов (с неподвижными ситами, с возвратно-поступательным, круговым и вибрационным движением сит, с горизонтальной и вертикальной осью вращения сита);
- по конфигурации ситовой поверхности (цилиндрические, конические, призматические).

Схемы просеивателей представлены на рис. 2.19.

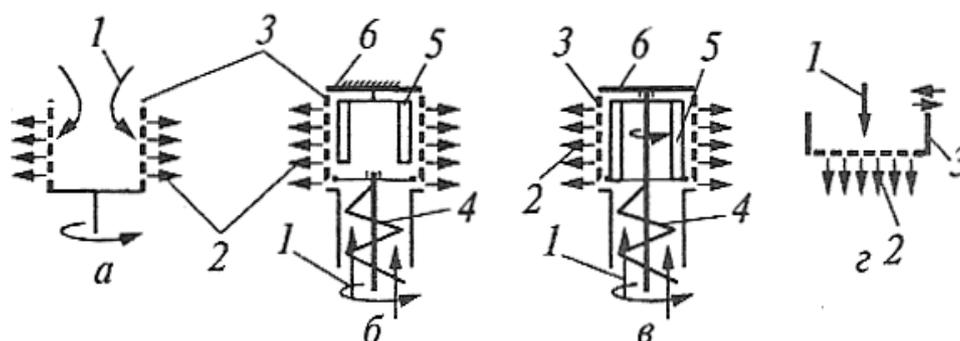


Рис. 2.19. Схемы просеивания сыпучих частиц:
а, б – с вращающимся ситом; в – с неподвижным ситом; г – с плоским ситом;
1 – продукт; 2 – проход; 3 – сито; 4 – шнек; 5 – ворошитель; 6 – крышка

Определим частоту колебаний плоского сита, для чего рассмотрим условия движения элементарной частицы на этом сите.

Из рис. 2.20 видно, что на частицу в состоянии покоя действует сила тяжести $G = mg$, которая раскладывается на две составляющих – силу нормального давления $N = G \cos \alpha$, которая прижимает частицу к поверхности сита, и тангенциальную силу $F_t = G \sin \alpha$, побуждающую частицу к перемещению по наклонной плоскости сита. Перемещению частицы препятствует сила трения, равна $F_{тр} = Nf = f(G \cos \alpha)$.

Частица будет находиться в покое при условии $f(G \cos \alpha) > G \sin \alpha$, т.е. $f > \operatorname{tg} \alpha$. Учитывая, что $f = \operatorname{tg} \varphi$, где φ - угол трения, то при $\varphi > \alpha$ частица будет находиться на сите в покое.

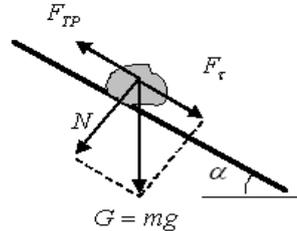


Рис. 2.20. Схема действующих на частицу сил в состоянии ее покоя

Для перемещения частицы материала по поверхности сита ему необходимо сообщить периодические колебания, которые приведут к возникновению еще одной силы, действующей на частицу – силе инерции. Если ускорение сита равно:

$$\varepsilon = \omega^2 r \cos \beta,$$

где ω – угловая скорость вращения кривошипа или эксцентрика,

β – угол его поворота,

то сила инерции будет равна:

$$F = m\varepsilon = \frac{G}{g} \omega^2 r \cos \beta.$$

Эта сила, также как и сила тяжести частицы, раскладывается на две составляющие: продольную $F_1 = F \cos \alpha$ и нормальную $F_n = F \sin \alpha$.

При периодическом движении наклонного сита на упругих подвесках нормальная составляющая силы инерции F_n будет менять направление (рис. 2.20).

Условие движения частицы вниз (рис. 2.20б) $F_1 + F_\tau > f(N - F_n)$ или $F_1 > f(N - F_n) - F_\tau$. Подставив значения сил, получим выражение:

$$\frac{G}{g} \omega^2 r \cos \alpha > f(G \cos \alpha - \frac{G}{g} \omega^2 r \cos \varphi \sin \alpha) - G \sin \alpha \quad (1).$$

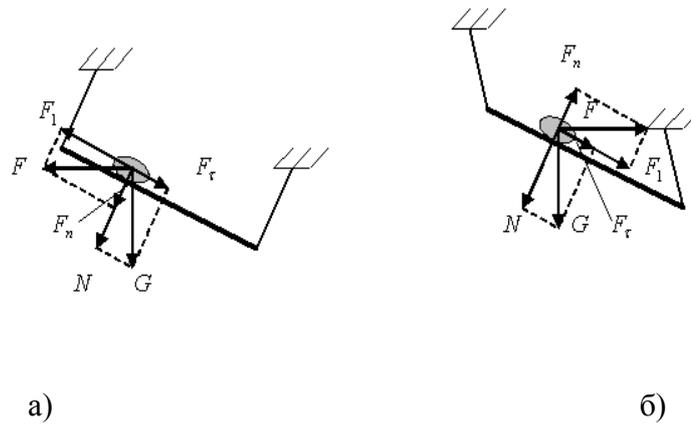


Рис. 2.20. Схема действия сил на отдельную частицу при возвратно-поступательном движении плоского сита

Можно видеть, что сила F_1 будет максимальной при $\cos\varphi = 1$. После преобразований (1), учитывая, что $f = \operatorname{tg}\varphi$, получим выражение для минимального числа колебаний сита, при котором будет сохраняться скольжение частицы:

$$n_{\min} = 30 \sqrt{\frac{\operatorname{tg}(\varphi - \alpha)}{r}}.$$

При увеличении числа колебаний сита возможен случай движения частиц вверх по ситовой поверхности. Это произойдет при условии $F_1 - F_\tau > f(N - F_n)$.

Из этого условия следует, что $n_{\max} = 30 \sqrt{\frac{\operatorname{tg}(\varphi + \alpha)}{r}}$. Таким образом, число колебаний плоского сита должно находиться в пределах $n_{\min} < n < n_{\max}$.

Рассмотрим условия просеивания сыпучих частиц на плоском сите. Задача формулируется следующим образом: необходимо определить размеры отверстий сита и критическую скорость относительного движения частицы V радиуса r , обеспечивающих ее просеивание с учетом сопротивления среды.

В начале свободного движения частицы на краю отверстия сита $\alpha = 0$, $\frac{dx_0}{dt} = V_0$ и $R = V_0^{-n}$ (рис.2.22).

Просеивание частицы обеспечивается в случае, если при $y = r$ $x \leq l - r$. В начале свободного движения частицы при $\alpha = 0$:

$$\frac{dx}{d\alpha} = V_0^2 / g \text{ и } \frac{dy}{d\alpha} = 0.$$

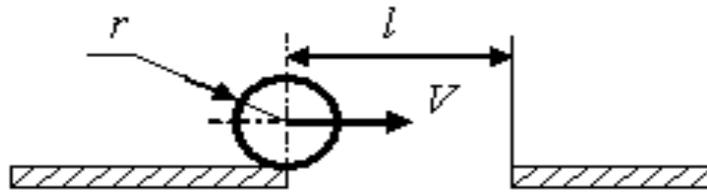


Рис.2.22 Схема просеивания частицы на плоском сите

Уравнение пологой траектории движения частицы на сите:

$$y = \frac{g}{(2k_0V_0)^2}(\exp(2k_0x) - 1) - \frac{gx}{2k_0V_0^2},$$

где k_0 – коэффициент парусности частицы.

При $y = r$, $x = l - r$ уравнение просеиваемости частицы имеет вид:

$$r - \frac{g}{(2k_0V_0)^2} \{ \exp[2k_0(l-r)] - 1 \} + \frac{g(l-r)}{2k_0V_0^2} = 0,$$

из которого критическая скорость просеиваемости будет равна:

$$V_0 = \sqrt{\frac{g}{4k_0^2r} \{ \exp[2k_0(l-r)] - 1 \} - \frac{g(l-r)}{2k_0r}}.$$

Пример. Требуется определить критическую скорость просеивания при радиусе частицы $r = 3$ мм, длине отверстия $l = 30$ мм и коэффициенте парусности частицы $k_0 = 0,3 \text{ м}^{-1}$.

По формуле акад. В.П.Горячкина критическая скорость частицы без сопротивления среды равна $\tilde{V}_0 = (l-r)\sqrt{g/2r} = 1,09$ м/сек. Разлагая выражение $\exp[2k_0(l-r)]$ в ряд и ограничиваясь тремя членами разложения $\exp[2k_0(l-r)] \approx 1 + [2k_0(l-r)] + \frac{1}{2}[2k_0(l-r)]^2$, формула (1) приводится к виду

$$V_0 = \tilde{V}_0 \sqrt{1 + \frac{2^2}{3!}k_0(l-r) + \frac{2^3}{4!}k_0^2(l-r)^2 + \dots} = 1,1 \text{ м/сек.}$$

Из приведенного примера можно видеть, что влияние сопротивления среды на критическую скорость просеивания при малых значениях k_0 и $(l-r)$ незначительно. С увеличением этих величин соответственно будет возрастать и

скорость V_0 .

Просеиваемость частиц во вращающемся ситовом барабане зависит от скорости частицы V_0 , скорости вращения барабана ω и ширины отверстий:

$$s = \frac{\pi D}{m} - s_0,$$

где D – внутренний диаметр барабана;

m – число отверстий по окружности барабана;

s_0 – длина по окружности барабана между отверстиями (рис.2.23).

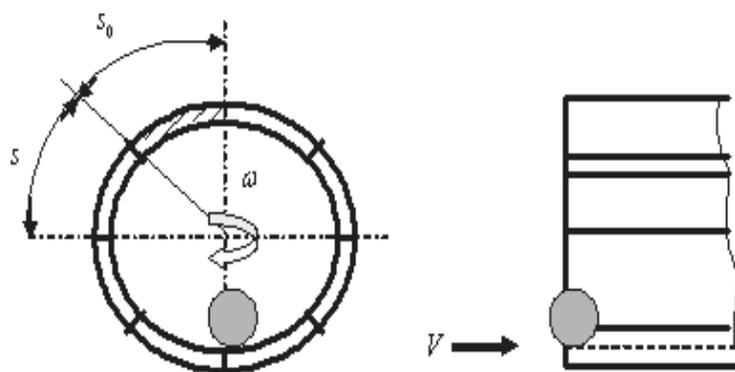


Рис 2.23. Схема движения частицы в ситовом барабане

Движение частицы является свободным и описывается уравнениями системы:

$$\begin{aligned} m \frac{d^2 x}{dt^2} &= -R \cos \alpha \\ m \frac{d^2 y}{dt^2} &= -R \sin \alpha - G \end{aligned}$$

Эти уравнения используются для определения параметров и режимов работы ситового барабана. За время прохождения частицей пути вертикально вниз $y = r$ внутренние точки барабана должны пройти расстояние $(s - r)$. Для ситового барабана условие просеиваемости можно записать в виде $t \leq t_\omega$, где t – время прохождения частицей пути; $y = r$, t_ω – время прохождения внутренней точкой барабана расстояния $(s - r)$.

На частицу, находящуюся внутри вращающегося барабана действует

центробежная сила:

$$F_c = mv^2 / R,$$

где m – масса частицы;

v – окружная скорость барабана;

R – радиус вращения барабана.

Кроме центробежной силы на частицу будет действовать сила трения и сила тяжести (рис. 2.24).

Из уравнения равновесия сил $G \sin \alpha = f \frac{mv^2}{R} + fG \cos \alpha$, где α – угол подъема частицы ($\alpha = 40 \dots 45^\circ$), при замене f на $\operatorname{tg} \varphi$ и v на $\pi R n / 30$, находится при заданном значении угла подъема число оборотов барабана.

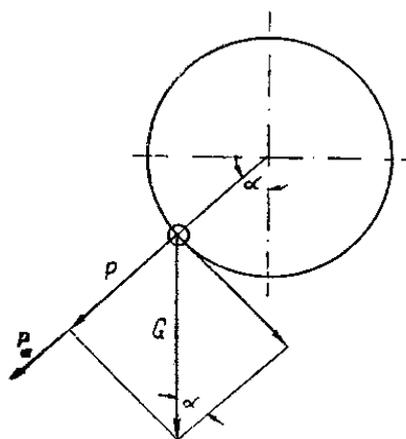


Рис. 2.24. Силы, действующие на частицу в ситовом барабане

Число оборотов барабана принимают равным $n = 12 / \sqrt{R}$.

На рис. 2.25 в качестве примера приведено устройство мукопросеивателя барабанного типа модели МП, который предназначен для просеивания и аэрации муки всех сортов, а также для просеивания крахмала, сахарного песка, соли и дробленых круп. При включении привода вращение от приводного вала через коническую передачу получает барабан. Частицы продукта центробежной силой отбрасываются к стенкам сита и проходят сквозь них. Крупные частицы остаются внутри барабана.

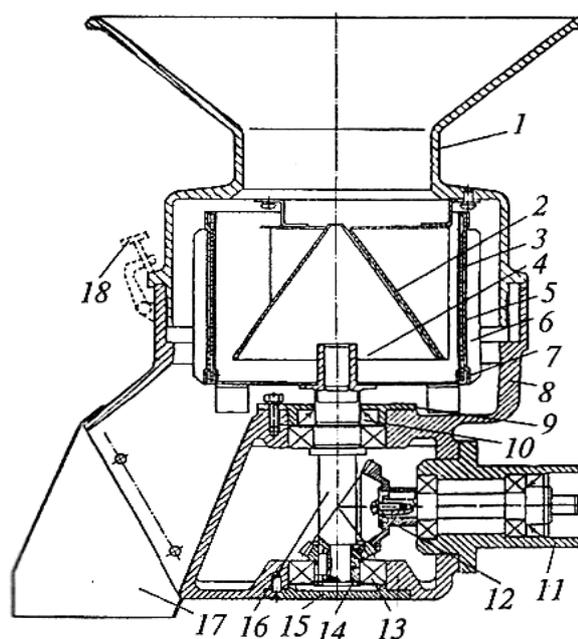


Рис. 2.25 Мукопросеиватель модели МП:

1 – бункер; 2 – шпилька; 3 – втулка, 8 – крышка; 5 – подшипник; 6,9 – конические шестерни; 7 – вал; 8 – крышка; 10 – вал барабана; 11 – манжета; 12 – днище; 13 – ситовый барабан; 14 – рассекатель; 15 – корпус; 16 – скребок; 17 – гайка

2.4. Процесс смешивания пищевых компонентов.

Модели и характеристики качества перемешивания. Аппараты для смешивания

Сущность процесса смешивания заключается в равном распределении компонентов из различных видов продуктов с разными физическими свойствами в общем объеме смеси. Под равным распределением понимается такое распределение, при котором в пробе любой массы или объема содержатся все компоненты с долевым участием соответствующим задаваемому составу.

Способ смешивания различных сухих сыпучих компонентов является неорганизованным (случайным), получаемым в результате ворошения частиц компонентов в каком-то объеме.

Интенсивность смешивания характеризуется производительностью и длительностью пребывания смеси в зоне перемешивания и скоростью движения перемешивающих органов.

Для оценки качества смешивания разных компонентов, различающихся по своим свойствам, могут быть использованы следующие показатели:

- показатель полноты смешивания;
- квадратичное отклонение полноты смешивания;
- коэффициент смешивания.

Показатель полноты смешивания $H(v)$ – это отношение отклонения реального состава смеси от заданного в разных объемах смеси. Полнота смешивания может быть выражена как:

$$H = 100 - \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \Delta_i(v),$$

где $\Delta_i(v) = \frac{100}{p_i} |p_{R_i} - \bar{p}_i|$;

p_{R_i} – процентное содержание i -го компонента в продукте согласно заданному рецепту;

\bar{p}_i – среднее процентное содержание i -го компонента в v единицах объема смеси.

Квадратичное отклонение полноты смешивания $B(v) = C^2(v)$.

Коэффициент смешивания для двухкомпонентной смеси:

$$K_{см}(v) = \frac{S^2\{\alpha_{f_i}\}}{S^2\{\alpha_{R_i}\}},$$

где $S^2\{\alpha_{f_i}\}$ – дисперсия фактической доли i -го компонента α_{f_i} в пробе смеси объема v единиц;

$S^2\{\alpha_{R_i}\}$ – дисперсия доли α_{R_i} того же компонента в максимально неравномерной смеси.

Полнота смешивания уменьшается с увеличением объема v , в котором определяется процентное содержание компонента.

Перемешивание сухих сыпучих сред. Смешивание частиц условно может быть разделено на три процесса:

- конвективное смешивание, представляющее собой перемещение групп

частиц из одного объема смеси в другой внедрением и скольжением слоев;

– диффузионное смешивание, рассматриваемое как постепенное перемещение частиц различных компонентов через вновь образованные границы их раздела;

– сегрегация – это группирование близких по форме и размерам частиц в разных местах смесителя.

Негативные последствия процесса смешивания сухих сыпучих компонентов с различными исходными массами и размерами проявляются в рассортировании компонентов по массе и размерам в полученной смеси. Это рассортирование проявляется в расслоении компонентов на разные фракции: более мелкие компоненты скапливаются внизу смеси, а более легкие и объемные – наверху.

Эффективность процесса перемешивания оценивается сравнением параметров, характеризующих степень смешивания до и после процесса. Для сравнения могут быть использованы градиенты полноты смешивания и коэффициента смешивания.

Эффективность процесса определяется коэффициентом эффективности $K_9 = S_2/S_1$ или показателем эффективности $\varepsilon_{см} = (1 - \frac{S_2}{S_1})100$, где S_i – параметры, характеризующие степень перемешивания частиц до и после процесса.

Исследования процесса смешивания проводятся с целью определения закономерностей перемешивания, эффективности работы смешивающих машин на разных режимах и статических и динамических характеристик.

При теоретических исследованиях процесса смешивания сыпучих материалов используются в основном вероятностные методы анализа, а при экспериментальных исследованиях – методы планирования экспериментов, в которых в качестве выходного параметра могут быть взяты приведенные выше показатели, характеризующие степень смешивания. Варьируемыми факторами

могут являться масса смеси, вводимая в машину за цикл смешивания, скорость рабочих органов, время цикла смешивания, расход потока смеси, уровень заполнения, плотность, размеры компонентов и др.

Рассмотрим задачу перемешивания твердых сыпучих измельченных пищевых материалов из зерновых и бобовых культур, используемых при приготовлении комбикорма.

При построении вероятностных моделей примем следующие упрощающие допущения:

- массы всех измельчаемых частиц одинаковы независимо от вида продукта;
- формы поверхностей частиц являются сферами;
- центры масс частиц, находящиеся в смешивающей емкости, образуют правильную объемную решетку;
- соседние частицы продукта имеют между собой только точечный контакт.

Для наглядности будем оперировать двумя компонентами, поступающими в емкость для перемешивания, в соотношении 50х50.

При построении моделей введем понятие *связности*, понимая под ней контактирование соседних частиц из одного и того же вида продукта. Будем считать связанными две любые соседние частицы продукта из одного и того же вида материала, если эта связь будет прослеживаться только в горизонтальной плоскости емкости – *слоистость* или только в вертикальной плоскости – *струйность*. Очевидно, в идеальном случае степень межчастичного смешивания компонентов будет максимальной при периодическом чередовании через частицу по горизонтали и вертикали двух компонентов.

При заполнении емкости вибросмешивающей машины в ней будут наблюдаться случайные распределения однородных по виду продукта массивов частиц. В процессе перемешивания эта однородность будет снижаться, а степень перемешивания увеличиваться.

Если в емкости провести секущую плоскость P на элементарном расстоянии dx от ее стенки, равном расстоянию от центра масс частиц до стенки (рис. 2.26а), и спроектировать на нее центры масс и внешние контуры поверхностей частиц, то в соответствии с принятыми допущениями получим плоскую прямоугольную решетку, где узлами будут являться центры масс, а внешние поверхности будут представлять окружности, отображающие сферические поверхности частиц на эту плоскость (рис. 2.26 б).

Обозначим через q отношение числа частиц одноименного материала, например, пшеницы, к общему числу частиц решетки $q = N_0 / N$, где N_0 - число частиц одноименного материала в секущей плоскости, N - общее число узлов плоской решетки.

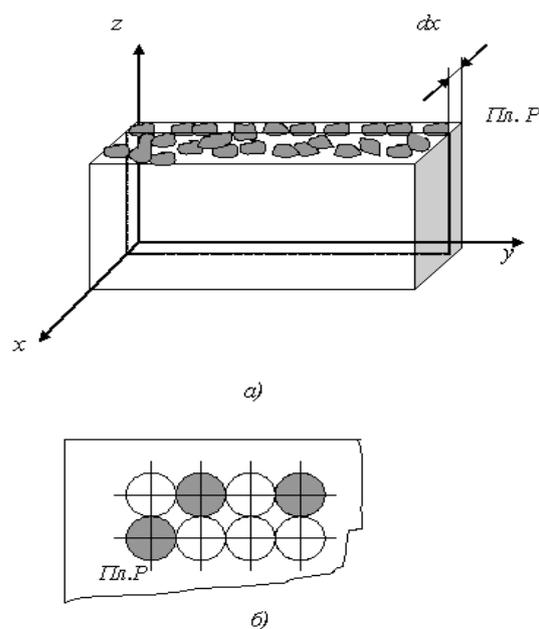


Рис. 2.26 . Модель плоской решетки

Будем считать смесь определенно перемешанной, если при некотором критическом значении $N_0 = N_{кр}$ нельзя будет проследить связность одноименных частиц по любой цепи как от верха и до низа емкости по всей ее высоте h (1- струйность частиц), так и от одной боковой стенки до другой по всей ее длине l (2- слоистость частиц), т.е. иными словами, если частицы из

одного и того же материала со всех сторон будут блокированы частицами другого материала (рис. 2.27). Отсюда следует, что степень смешивания будет увеличиваться по мере увеличения числа заблокированных узлов.

Очевидно, в процессе перемешивания в каждый момент времени последовательность расположения заблокированных и связанных узлов в решетке будет являться случайной величиной.

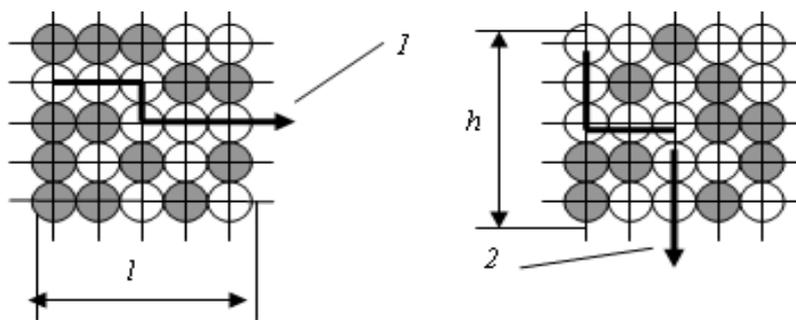


Рис.2.27. Модели слоистости (1) и струйности (2) частиц

Однако чем больше узлов будет содержать решетка, т.е. чем меньше будут частицы перемешиваемых компонентов, тем случайные последовательности заблокированных и связанных узлов будут все меньше отличаться друг от друга. Поэтому чем больше N , тем меньшую роль будет играть случайность и при $N \rightarrow \infty$ будет существовать предел равный:

$$N_{KP} = \lim_{N \rightarrow \infty} N_{KP}(N).$$

Рассмотрим модель элементарной решетки, состоящей из 4-ех частиц. Из рис.2.28 видно, что критическая доля или порог связности для случая Б равна $1/4$, для случаев Д - Е – $1/2$, т.е. порог связности является дискретной случайной величиной.

Вероятности того, что эта величина примет каждое их данных значений, обозначим, как $P(1/4)$ и $P(1/2)$. Можно видеть, что вероятность $P(1/4)$ равна вероятности того, что вторым окажется узел 2 или 3, или 4, а $P(1/2)$ равна вероятности того, что вторым окажется узел 3 и 2 или 4 и 1.

После блокирования узла 1 (случай Б) все три оставшиеся узла имеют одинаковую вероятность быть заблокированными в следующий раз, а так как сумма трех вероятностей равна 1, то каждая из них будет равна $1/3$.

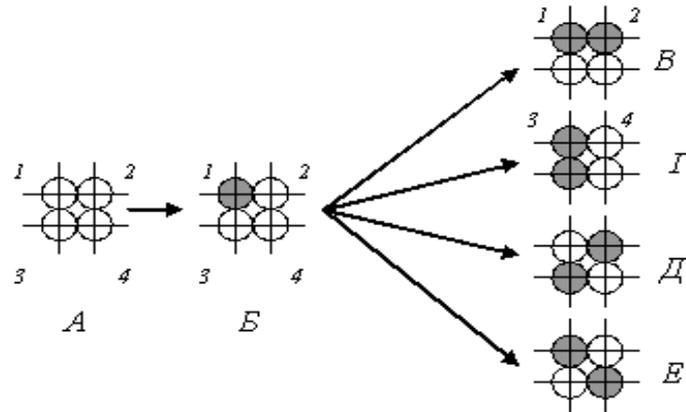


Рис.2.28. Модель элементарной решетки

Следовательно, $P(1/4)=1/3$, а $P(1/2)=2 \cdot 1/3 = 2/3$. Согласно правилу сложения вероятностей $P(1/4)+P(1/2)=1$, тогда среднее значение порога связности для данной элементарной решетки:

$$\bar{N}_{KP}(N=4)=1/2P(1/2)+1/4P(1/4)=0,41.$$

Пусть $P_k(q)$ – вероятность того, что выбранная наугад частица принадлежит цепи, состоящей из не менее чем k частиц. Это значит, что выбранная наугад частица из данного материала и связана с не менее чем $k-1$ такими же частицами. Найдём $P_k(q)$ при $k=1$ и $k=2$. $P_1(q)=q$ – вероятность того, что выбранная наугад частица является частицей, например, пшеницы. Тогда доля частиц из кукурузы будет равна $1-q = n_K/N$, где n_K – число частиц из кукурузы в цепи. Доля частиц из пшеницы будет соответственно равна:

$$q = \frac{(N - n_K)}{N}.$$

Если выбрать случайно r частиц, то среди них окажется rq частиц из пшеницы и $q(1-r)$ частиц из кукурузы. Поэтому вероятность того, что случайно

выбранная частица окажется частицей из кукурузы, равна $r(1-q)/r = 1-q$, а вероятность того, что она из пшеницы $qr/r = q$. Так как частица может быть либо из пшеницы, либо из кукурузы, то сумма вероятностей $(1-q) + q = 1$, следовательно $P_1(q) = q$.

Событие, состоящее в том, что все 4 частицы являются частицами из кукурузы, и событие, состоящее в том, что, по крайней мере, среди них есть одна частица из пшеницы, образуют полную систему событий, сумма вероятностей которых равна 1.

Вероятность того, что одна из частиц является частицей из кукурузы, равна $1-q$, как и вероятность того, что и каждая из трех оставшихся частиц также из кукурузы. Событие, состоящее в том, что все 4 частицы, окружающие центральную, из кукурузы, является независимым, поэтому вероятность этого равна произведению вероятностей $(1-q)^4$. Отсюда, учитывая $1 - (1-q)^4$, вероятность $r_2(q) = q[1 - (1-q)^4]$. При $q < 1$ членами с высшими степенями можно пренебречь, т.е. $1 - (1-q)^4 \approx 4q$, откуда следует $P_2(q) \approx 4q^2$.

При принятых допущениях аналогичная картина получается для трехмерной решетки. Каждая частица будет иметь 6 ближайших соседей, расположенных от нее в направлении ребер куба, тогда $P_2(q) \approx 6q^2$. Очевидно для любой размерности решетки, в которой каждая частица имеет m ближайших соседей, будет выполняться равенство $P_2(q) = q[1 - (1-q)^m]$ и при $q < 1$ $P_2(q) \approx mq^2$.

Поскольку i -ая частица согласно допущению имеет форму сферы с радиусом равным $\frac{1}{2}$ расстояния до ближайшей частицы и что связность будет иметь место тогда, когда доля объема, занимаемого одноименными частицами, превысит некоторое критическое значение, то коэффициент заполнения емкости частицами будет равен доле объема, занятой сферами, построенными вокруг центра каждого узла решетки и имеющими радиус равный половине расстояния до ближайшей частицы.

Так как для плоской решетки на долю одного узла приходится площадь r^2 , то коэффициент заполнения равен $K_{KB} = \left(\frac{\pi r^2}{4}\right) / r^2 = 0,8$. Для объемной решетки $K_{КВБ} = \left(\frac{4\pi r^3}{24}\right) / r^3 = 0,5$.

Доля объема емкости, заполненной, например, частицами пшеницы равна $K_i N_0$, а на пороге связности $K_i N_{KP}$. Поскольку N_{KP} для плоской решетки равно 0,59, а для объемной 0,31, то произведение $[K_{KB} N_{KP}] = 0,47$ и $[K_{КВБ} N_{KP}] = 0,16$. Так как $K_i N_{KP}$ величина практически постоянная, не зависящая от вида решетки в заданном ее классе, то возможно сравнительно легко определить порог связности для любой решетки, рассчитав коэффициент заполнения емкости по средним размерам частиц и допущении определенной формы их поверхности.

Анализ вероятностных моделей показывает, что:

- форма поверхности смешиваемых частиц при постоянной размерности не оказывает практического влияния на критическое значение, при котором возникает их связность;
- распределение центров масс частиц как упорядоченное, так и случайное, не оказывают влияния на величину критического значения связности частиц;
- эффективность межчастичного перемешивания увеличивается по мере уменьшения размеров частиц.

В пищевых производствах и на предприятиях общественного питания широко распространен способ механического перемешивания различных пищевых сред.

В зависимости от технологии перемешивающее оборудование можно разделить на три группы: для перемешивания сыпучих, пластичных, вязких и жидких продуктов.

По конструктивному исполнению перемешивающие аппараты могут быть с вертикальным, горизонтальным или наклонным расположением рабочих

органов и рабочей камеры.

Для перемешивания сыпучих материалов используются смесители вибрационного типа или с лопастными исполнительными органами.

Аппараты для перемешивания по скоростным показателям делятся на тихоходные, для которых критерий Фруда составляет:

$$Fr = \frac{v^2}{Rg} < 30,$$

где v – окружная скорость вращения;

R – радиус вращения;

g – ускорение силы тяжести.

На рис. 2.29 приведены схемы основных типов смесителей сыпучих частиц.

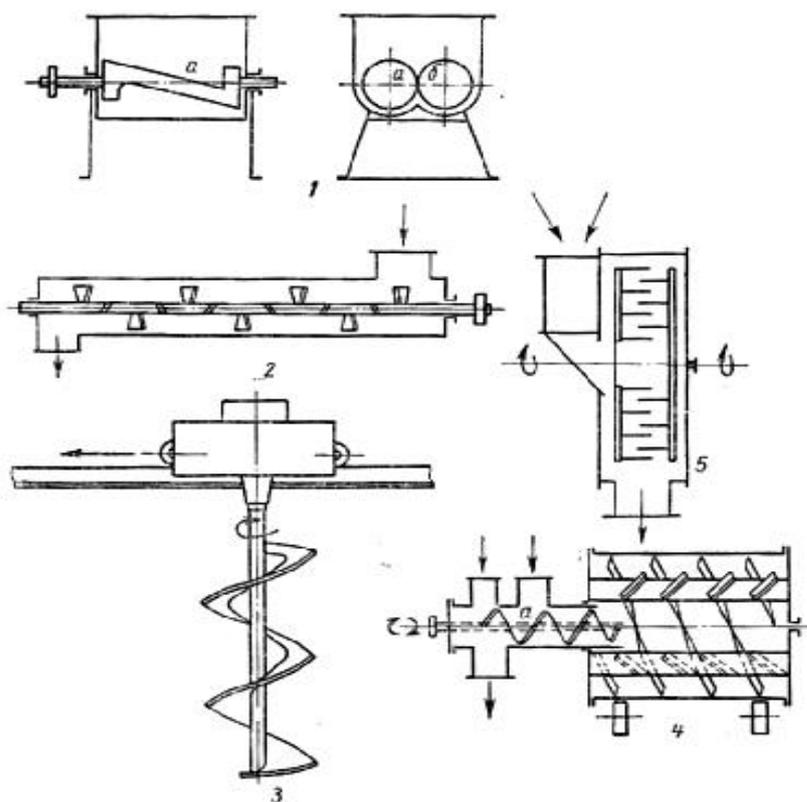


Рис. 2.29. Схемы основных типов смесителей сыпучих частиц:
1 – лопастной смеситель; 2 – шнековый смеситель; 3 – ворошитель солода;
4 – барабанный смеситель; 5 – штифтовой смеситель

На рис. 2.30 показан общий вид смесителя непрерывного действия модели Б2-КСН, предназначенного для смешивания сыпучих компонентов при производстве мучных кондитерских изделий и сладких блюд. Дозируемые

компоненты поступают из бункера в шнековый питатель и далее в лопастной смеситель, лопастные валы которого вращаются в противоположные стороны.

Производительность машины до 1000 кг/ч, продолжительность цикла 10 минут, установленная мощность 4 кВт.

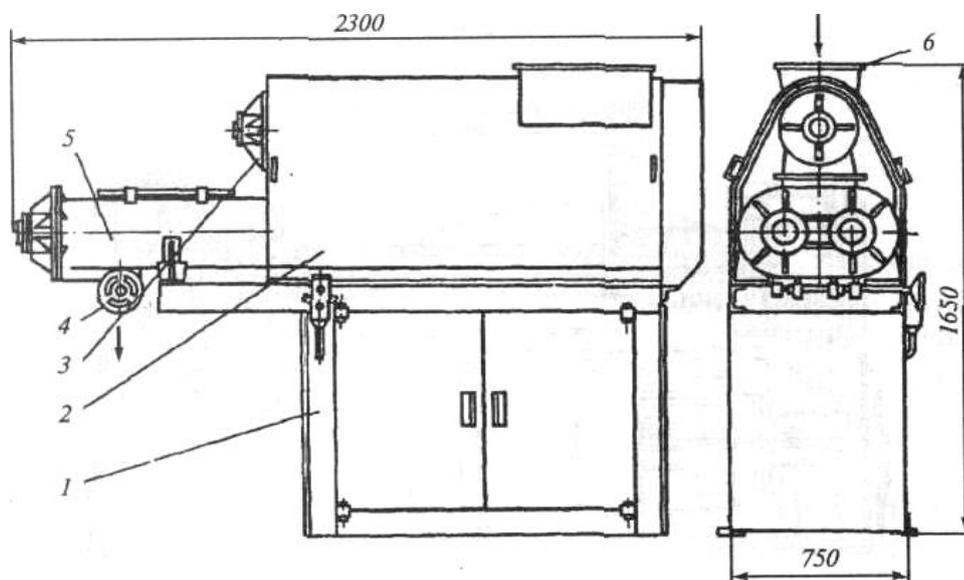


Рис. 2.30. Смеситель непрерывного действия модели Б2-КСН:
1 – рама сварная; 2 – корпус; 3 – питатель;
4 – заслонка; 5 – смеситель; 6 – бункер

Перемешивание пластичных и вязкоупругих сред. Для перемешивания пластичных и вязкоупругих пищевых сред, например, при замесе теста используются тестомесильные машины периодического действия, которые в зависимости от вида муки, рецептурного состава и особенностей ассортимента оказывают различное механическое воздействие на тесто.

Выделяют пять последовательных стадий процесса формирования теста (рис. 2.31):

- *составление смеси* – первая стадия вымешивания;
- *соединение* – вторая стадия, после которой продукт представляет собой клейкую малоэластичную массу;
- *собственно вымешивание* – третья стадия, после которой тесто представляет собой вязкоупругую массу, не прилипающую к стенкам дежи;
- *развитие* – четвертая стадия, при которой вязкость и эластичность теста возрастают, а плотность достигает максимального значения;

– *обминка* – на данной стадии плотность начинает падать, и тесто становится менее эластичным, его газодерживающая способность снижается.



Рис. 2.31. Замес теста

Управление процессом замешивания на тестомесильной машине является важным моментом для определения оптимального времени процесса. Используют два метода контроля развития теста и регулирования его однородности: общей затраченной работы и пикового развития теста. Первый метод использует устройство замера мощности при измерении общей работы, затраченной на вымешивание. С помощью второго метода измеряют мощность для максимума развития теста. Величина максимального крутящего момента или мощности, развиваемой двигателем, определяет степень развития теста.

Таким образом, технологическая цель замеса теста заключается в получении однородной массы, состоящей из смеси рецептурных ингредиентов, а также проведение теста в состояние, при котором его свойства обеспечат оптимальное протекание стадий производственного процесса и получение хлеба наилучшего качества.

При замесе теста происходит насыщение тестовой массы воздухом. При этом белки теста начинают интенсивно впитывать влагу, а их нерастворимые в воде фракции образуют клейковинный пространственный каркас, соединяющий смежные цепочки белков. Эти связи упрочняют структуру теста и снижают его

липкость.

Машины периодического действия выпускаются с месильными емкостями (дежами) стационарного или сменного типа. Дежи бывают неподвижные, со свободным или принудительным вращением.

По интенсивности воздействия рабочего органа на тесто тестомесильные установки делятся на три группы:

- тихоходные (процесс перемешивания ингредиентов идет без нагрева теста);
- быстроходные (тесто нагревается на $5...7^{\circ}\text{C}$);
- супербыстроходные (замес сопровождается повышением температуры теста на $10...20^{\circ}\text{C}$ и требует охлаждения).

По характеру движения месильного органа различают машины с круговым, вращательным, планетарным и сложным движением месильного органа.

На рис. 2.32 в качестве примера приведен общий вид тестомесильной машины фирмы «Sigma» (Германия).

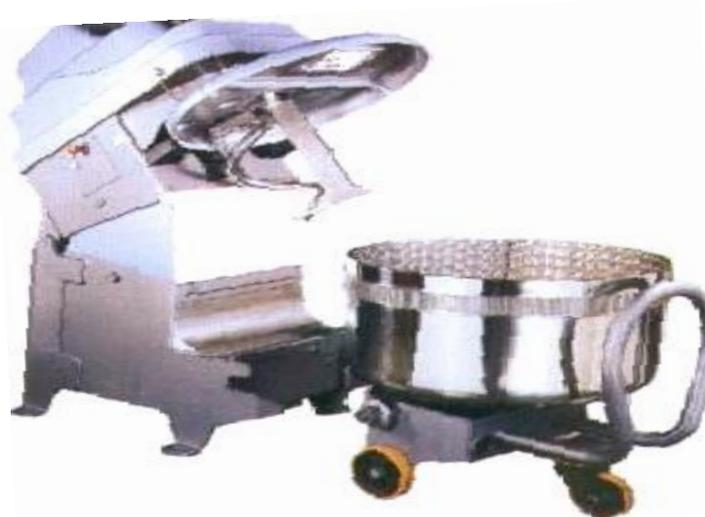


Рис. 2.32. Общий вид тестомесильной машины периодического действия с подкатной дежей

Машина имеют отдельный привод дежи и перемешивающего органа. Унифицированный цифровой контроллер позволяет программировать две стадии замеса теста. Спиральный рабочий орган машин имеет две рабочие скорости. Машины могут оснащаться по заказу таймером и подъемником для

разгрузки чаши. Для облегчения съема теста в конце замеса осуществляется реверс спирали.

Производительность тестомесильных машин периодического действия

$$P = \frac{k_1 V \rho}{\tau_3 + \tau_B},$$

где k_1 – коэффициент использования дежи;

V – объем дежи;

τ_3, τ_B – время замеса и время на вспомогательные операции

соответственно.

Мощность двигателя привода:

$$N = (N_1 + N_2) / \eta,$$

где $N_1 = 4 \cdot 10^{-4} k_1 V \rho R \omega_1 g$;

ω_1 – угловая скорость месильного органа;

R – радиус вращения центра лопасти;

$N_2 = 10^{-3} g (G_d + G_T) f r_y \omega_2$;

ω_2 – угловая скорость дежи;

f – коэффициент трения вала дежи в опорах;

G_d, G_T – масса дежи и теста соответственно;

r_y – радиус цапфы.

Перемешивание жидких и вязких сред. В различных отраслях пищевой промышленности возникает необходимость в перемешивании и взбивании жидких продуктов, когда требуется:

- соединить две или несколько жидкостей;
- сохранить определенное технологическое состояние эмульсий и суспензий;
- равномерно распределить твердые ингредиенты в жидкости;
- растворить какое-либо содержимое в жидкости;
- поддержать определенную температуру и консистенцию продукта.

Перемешивающие аппараты классифицируются по следующим

признакам:

- по назначению (для смешивания, растворения, темперирования и т.д.);
- по расположению (вертикальные, горизонтальные, наклонные);
- по характеру обработки среды (смешивание во всем объеме или в части объема);
- по характеру движения жидкости в аппарате (радиальное, осевое, тангенциальное);
- по принципу действия (механические, пневматические, эжекторные, циркуляционные аппараты);
- по отношению к тепловым процессам (со стеночной поверхностью теплообмена), с погружной поверхностью теплообмена).

Механические аппараты получили наибольшее распространение. По конструктивному исполнению они делятся на лопастные, рамные, планетарные, пропеллерные, турбинные.

Наиболее известной конструкцией реактора является модель МЗС-316 (рис. 2.33).

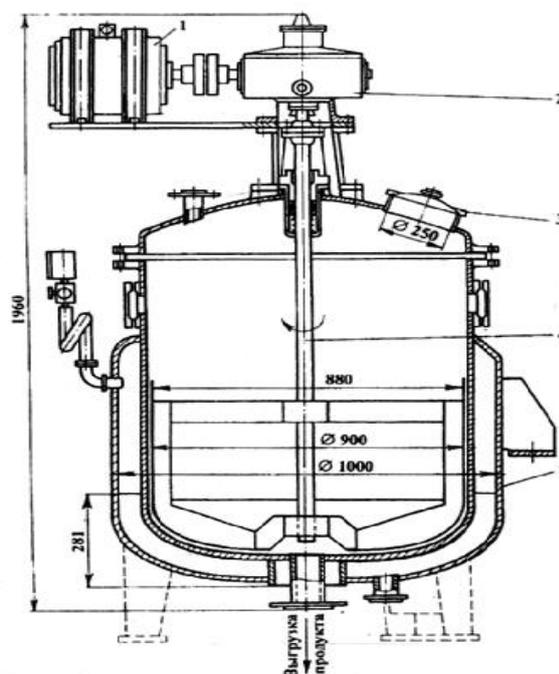


Рис. 2.33. Реактор модели МЗС-316:

1 – электродвигатель; 2 – редуктор; 3 – крышка; 4 – мешалка; 5 – корпус

На рис. 2.34 приведена схема к расчету параметров лопастной мешалки.

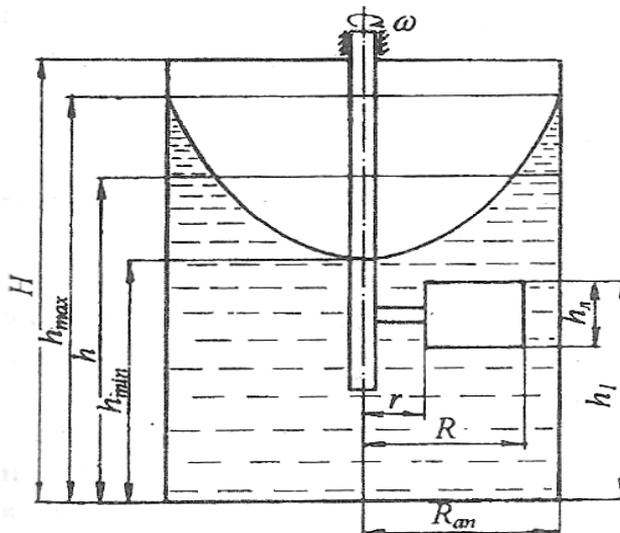


Рис. 2.34. Расчетная схема лопастной мешалки

Уровень жидкости в спокойном состоянии:

$$H = V / \pi R_{an}^2,$$

где V – объем жидкости;

R_{an} – радиус аппарата.

Предельная угловая скорость вращения лопасти, при которой жидкость в емкости размерами D и H , м, налитая до уровня h , не выплеснется через край емкости, будет равна $\omega_{H.B.} < \frac{2}{R_{an}} \sqrt{g(H - h_{max})}$.

Предельная угловая скорость вращения лопасти, которую она может иметь для того, чтобы ее верхний край не оказался выше уровня перемешиваемой жидкости $\omega_{H..л.} < \frac{2}{R_{an}} \sqrt{g(H - h_{min})}$.

Предельная угловая скорость вращения лопасти, при которой будет выполнено условие не обнажения дна аппарата $\omega_0 = \frac{2}{R_{an}} \sqrt{h}$.

Максимальная высота жидкости в аппарате, м,

$$h_{max} = h + \frac{\omega_{PAB}^2 R_{an}^2}{4g}.$$

Высота аппарата, м, $H = h_{max} + K$,

где K – некоторый запас высоты, м, ($K = 0,5...1,2$ м).

Минимальная высота жидкости в аппарате, при которой процесс будет

протекать нормально, равна моменту навалу лопасти:

$$M = \frac{c\rho h_{\text{Л}}\omega_{\text{РАБ}}}{4}(R_{\text{Л}}^4 - r_{\text{Л}}^4),$$

где c – коэффициент сопротивления, величина которого зависит от формы и скорости тела, вязкости жидкости и т. п. ($c = 20 \dots 180$);

ρ – плотность перемешиваемой жидкости, кг/м^3 ;

$h_{\text{Л}}$ – высота лопасти, м;

$R_{\text{Л}}, r_{\text{Л}}$ – радиусы вращения наружного и внутреннего краев лопасти

соответственно, м.

Мощность потребная на вращение одной лопасти равна: $N = M\omega_{\text{РАБ}}$.

Мощность электродвигателя привода вала лопастной мешалки:

$$N_{\text{э}} = N z k_3 / \eta,$$

где z – количество лопастей на валу, шт.;

η – общий к.п.д. привода ($0,82 \dots 0,94$);

k_3 – коэффициент запаса мощности ($1,5 \dots 1,8$).

Для перемешивания жидкостей с невысокой вязкостью используется также пневматический способ перемешивания, схема которого приведена на рис. 2.35

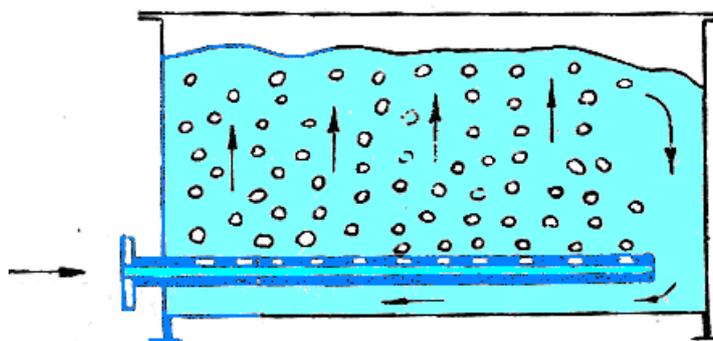


Рис. 2.35. Схема пневматического перемешивания жидкой среды

Процесс *взбивания* содержит три основные операции:

– равномерное распределение компонентов в объеме дежи (собственно перемешивание компонентов);

- растворение отдельных компонентов;
- насыщение смеси воздухом.

На рис.2.36 приведен общий вид и исполнительные элементы миксера модели ПМ900 фирмы «Метос» (Финляндия).



Рис. 2.36. Общий вид миксера модели ПМ900

Универсальный миксер модели РМ900 служит для перемешивания картофельного пюре, дрожжевого, слоеного и бисквитного теста, взбивания сливок. Он оснащен дополнительными сменными механизмами для приготовления фарша и отжима сока. Миксер имеет бесступенчатый регулятор скорости, два привода, один из которых односкоростной для мясорубки, другой высокоскоростной для блендера, соковыжималки и миксера. В комплектацию миксера входит венчиковая мешалка, спиральная мешалка для теста, лопаточная мешалка и дежа.

Взбивально-перемешивающие машины делятся на две большие группы: с вращением рабочего органа вокруг собственной оси и с планетарным движением рабочего органа.

На рис. 2.37 приведена схема взбивально-перемешивающей машины модели МВ-35 с планетарным движением рабочего органа.

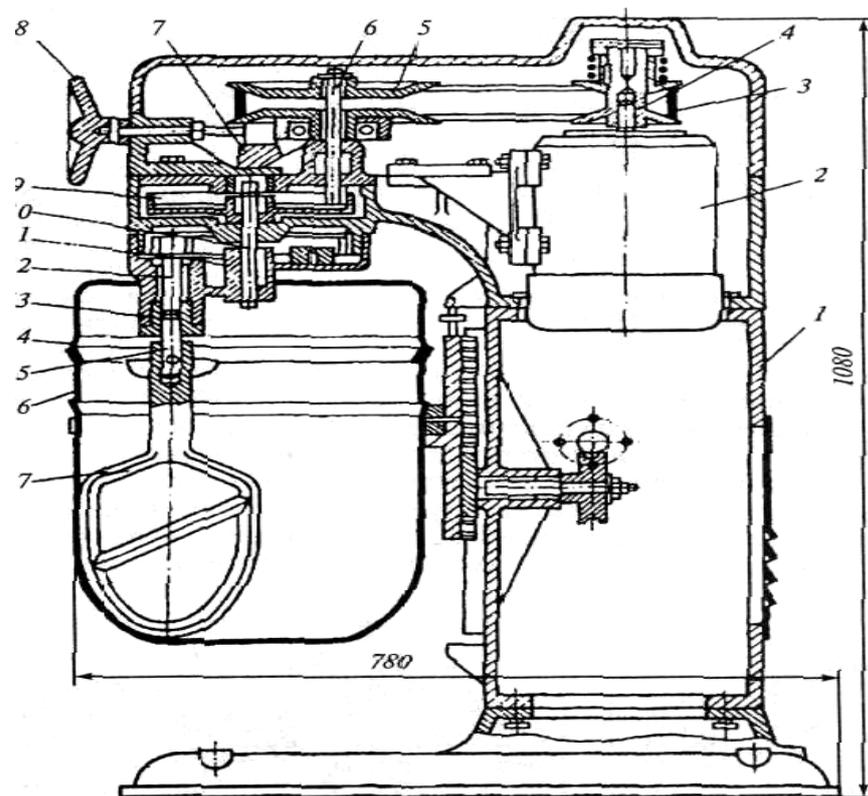


Рис. 2.37. Вибриательно-перемешивающая машина модели МВ-35:

1 – станина; 2 – двигатель; 3 – ремень; 4 – нижний диск; 5 – верхний диск; 6 – вал вертикальный; 7 – вилка перемещения нижнего ведомого диска; 8 – маховик; 9 – колесо зубчатое; 10 – вал; 11 – неподвижное зубчатое колесо; 12 – планетарный механизм; 13 – корпус планетарного механизма; 14 – обечайка; 15 – вал взбивателя; 16 – бачок; 17 – взбиватель (венчик)

Назначение машины: взбивание сливок, кремов, яиц и других кондитерских масс, в том числе для замешивания сахарных сортов теста.

Угловая скорость рабочего органа машины $6,28 \dots 44 \text{ рад}^{-1}$, объем емкости 35 л, мощность привода 0,7 кВт.

Для оценки энергоэффективности процесса перемешивания жидких сред можно использовать метод анализа размерностей. Из практики известно, что мощность работы мешалки зависит от вязкости и плотности жидкости, частоты вращения и определяющего размера рабочего органа, т.е. $N = f(\mu, \rho, n, d)$ или $N = A \mu^x \rho^y n^z d^v$. Имеем пять переменных, число критериев будет равно двум.

Выпишем размерности величин:

$$[N] = \text{вт} = \frac{\text{н} \cdot \text{м}}{\text{сек}} = \left(\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{сек}^2} \right) \frac{\text{м}}{\text{сек}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{сек}^3}.$$

$$[\mu] = \frac{\text{н} \cdot \text{сек}}{\text{м}^2} = \left(\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{сек}^2} \right) \frac{\text{сек}}{\text{м}^2} = \frac{\text{кг}}{\text{сек} \cdot \text{м}}.$$

$$[\rho] = \frac{\kappa\zeta}{\text{м}^3}, [n] = \frac{1}{\text{сек}}, [d] = \text{м}.$$

Уравнение размерностей:

$$\frac{\kappa\zeta \cdot \text{м}^2}{\text{сек}^3} = \left(\frac{\kappa\zeta}{\text{сек} \cdot \text{м}}\right)^x \left(\frac{\kappa\zeta}{\text{м}^3}\right)^y \left(\frac{1}{\text{сек}}\right)^z (\text{м})^v \text{ или } \kappa\zeta \cdot \text{м}^2 \text{сек}^{-3} = \kappa\zeta^{x+y} \cdot \text{сек}^{-x-z} \cdot \text{м}^{(-x-3y+v)}.$$

Система уравнений:

$$\begin{aligned} \kappa\zeta \quad 1 &= x + y \\ \text{м} \quad 2 &= -x - 3y + v \\ \text{сек} \quad -3 &= -x - z \end{aligned}$$

Имеем $y = 1 - x$; $v = 5 - 2x$; $z = 3 - x$.

$$N = A \mu^x \rho^{1-x} n^{3-x} d^{5-2x}.$$

Составляя комплексы, получим:

$$N = A \rho n^3 d^5 \left(\frac{\mu}{\rho n d^2}\right)^x \text{ или } \frac{N}{\rho n^3 d^5} = A \left(\frac{\rho n d^2}{\mu}\right)^{-x}.$$

Безразмерный комплекс $\frac{N}{\rho n^3 d^5}$ называется критерием Эйлера для перемешивания Eu_M . Критерий $\left(\frac{\rho n d^2}{\mu}\right)$ является видоизмененным критерием Рейнольдса и обозначается Re_M .

Таким образом, общий вид критериального уравнения для расхода энергии при перемешивании имеет вид $Eu_M = A Re^k$, где коэффициент A и показатель k определяются экспериментально.

2.4. Обработка пищевых материалов давлением

Обработка продовольственного сырья давлением относится к одной из распространенных технологических операций пищевых производств. С помощью механического давления на продукт со стороны исполнительных элементов оборудования осуществляется отделение жидкости из влажных материалов (отжим, прессование), придание пластичным материалам определенной формы (штамповка или отсадка), соединение частиц сыпучих

материалов в плотносвязную субстанцию (прессование, экструдирование), изменение структуры жидких продуктов (гомогенизация), обработка вторичных отходов пищевых производств (компактирование, брикетирование).

На рис. 2.38 приведена классификация оборудования для обработки пищевого сырья давлением.

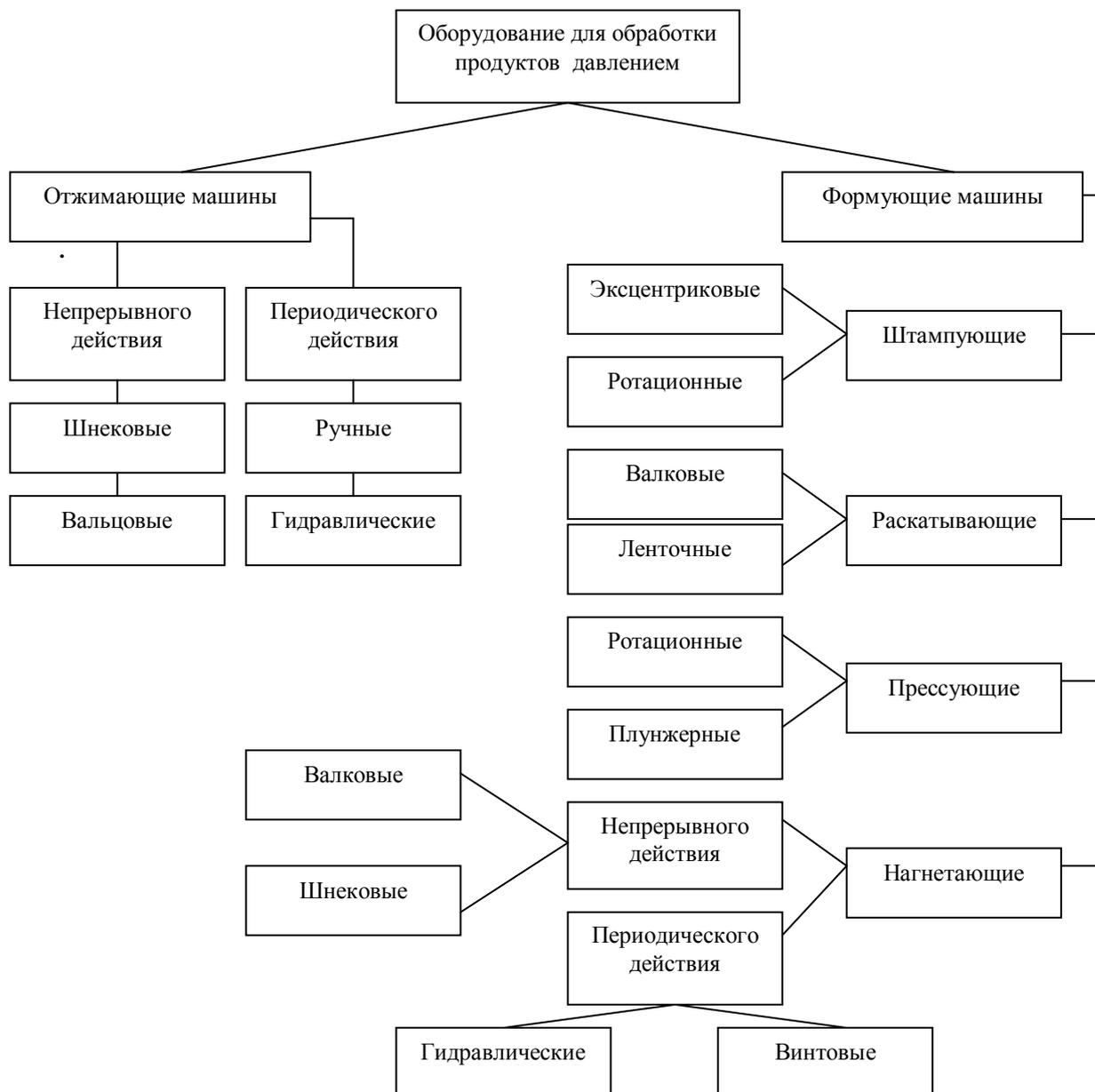


Рис. 2.38. Классификация оборудования для обработки пищевых материалов давлением

Так, путем отжима из овощей, ягод и фруктов получают соки, из маслосодержащих семян – растительное масло или удаляют влагу из свекловичного жома. Штамповка используется при производстве

полуфабрикатов мучных кондитерских изделий, например, тестовых заготовок песочного печенья; отсадка – при получении кондитерских изделий. Прессование используется при производстве сахара-рафинада. Гомогенизации подвергаются жидкие молочные продукты.

Одним из основных направлений развития пищевых технологий является создание сбалансированных по составу продуктов, соответствующих концепции здорового питания, т.е. использование в рецептурах продуктов экологически чистого сырья и полуфабрикатов. Дальнейшее совершенствование пищевых технологий невозможно без соответствующего машинно-аппаратурного обеспечения. В последнее время все большее использование в пищевых производствах находит перспективный способ экструзионной обработки продуктов, который способствует углубленной обработке сырья.

Экструзия (выдавливание) – это процесс термомеханической обработки пищевого сырья путем выдавливания через формующее отверстие рабочего органа с целью получения изделий заданной формы, структуры и физико-химических свойств.

В пищевой промышленности для выпуска экструдированных изделий в основном используют крахмалосодержащее и высокобелковое сырье. Если придать материалу вязкопластичные свойства, то можно экструдировать практически любой продукт. В качестве сырья при экструдировании широко используют соевые муку, изоляты и концентраты, зерновые культуры, картофель, вторичное сырье мясной, молочной и рыбной промышленности. Известны такие продукты экструзии, как сухие зерновые завтраки, макаронные изделия, хрустящие хлебцы, кондитерские изделия, чипсы, снеки, сухие супы, соусы и приправы и т.п.

По сравнению с другими технологиями экструзия является экологически безопасным, ресурсосберегающим и универсальным процессом, отличающимся компактностью, небольшим расходом энергии, высокой степенью механизации, непрерывностью и высоким качеством готовых изделий.

По физической сущности экструзия это процесс обработки давлением, одна из разновидностей прессования материала, отличающаяся от него тем, что при прессовании происходит сдавливание, а при экструдировании – формование продукта путем выдавливания материала через формующую матрицу.

Для получения экструдированных пищевых продуктов используют три основных способа:

- холодная экструзия, при которой в материале происходят только механические изменения при его перемещении под давлением. При холодной экструзии массовая доля влаги в сырье составляет 30...60%;

- теплая экструзия, при которой сухие компоненты сырья смешивают с определенным количеством воды (20...30%) и подают в экструдер, где подвергают механическому и тепловому воздействию (аутогенная экструзия);

- горячая экструзия, при которой процесс протекает при высоких скоростях и давлениях при значительной диссипации механической энергии. Массовая доля влаги в сырье составляет 10...20%, а температура превышает 120⁰С (термопластическая экструзия). Горячая экструзия сопровождается взрывным эффектом выходящего из экструдера продукта, приводящим к увеличению его объема.

Физико-механические свойства материала при обработке давлением характеризуются следующими факторами:

- модулем прессуемости, т.е. способностью продукта к уплотнению под действием приложенного давления (без учета потерь на трение);

- коэффициентом бокового давления, равным отношению бокового давления со стороны материала к действующему осевому давлению;

- плотностью, влажностью и температурой пищевого продукта;

- гранулометрическим составом продукта.

Условия прессования пищевых материалов характеризуются:

- удельным давлением прессования;

- коэффициентом трения продукта о рабочие органы экструдера;

- формой и режимом получаемого материала;
- площадью приложения давления.

На рис. 2.39 приведена классификация экструдеров, используемых в пищевых производствах.

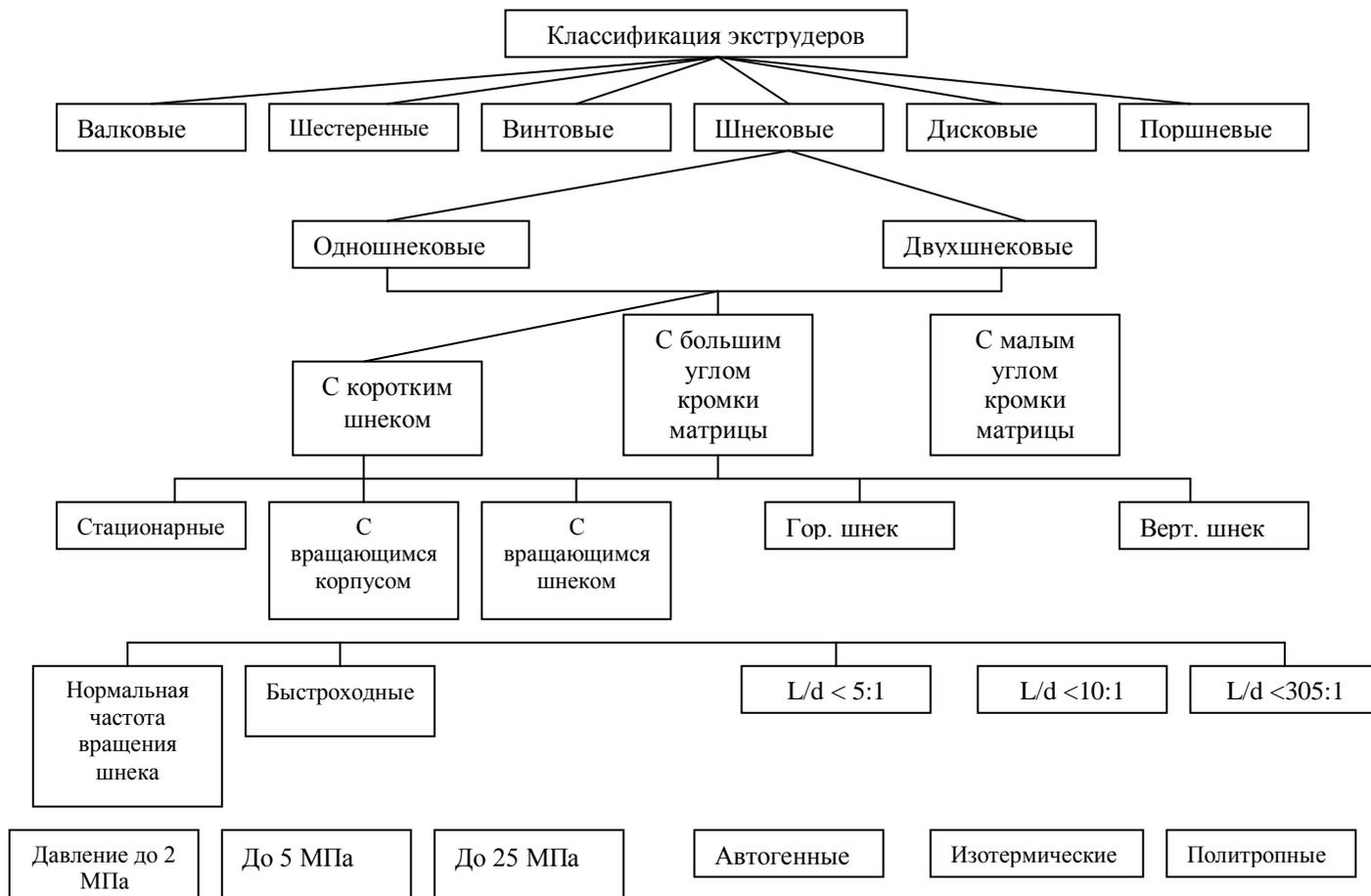


Рис. 2.39. Классификация экструдеров

Эффективность прессования характеризуется коэффициентом уплотнения:

$$\beta_y = V_n / V_k,$$

где V_n, V_k – начальный и конечный объемы материала.

Эффективность прессования может быть охарактеризована также коэффициентом прессования $K_n = (V_n - V_k)100/V_n$. В зависимости от свойств материала $\beta_y = 3...20$; $K_n = 60...95\%$.

Объемная часть продукта после экструдирования:

$$V_0 = \rho(1 + k_{ноп}),$$

где ρ – плотность продукта;

$k_{пор} = V_{пор} / V_m$ – коэффициент пористости материала;

$V_{пор}$ – объем пор;

V_m – объем монолитного сырья.

Работа прессования:

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

где S – площадь поперечного сечения прессуемого материала;

p – давление прессования;

h_0, h_k – начальная и конечная высота материала.

В процессе экструзии пищевой материал подвергается деформации, которая может быть обратимой (упругой) или необратимой (вязкой и пластической, не исчезающей после снятия нагрузки). Основными реологическими свойствами материала являются упругость, пластичность, вязкость и прочность. Под упругостью понимается способность тела восстанавливать свою первоначальную форму (объем). Упругость тел характеризуется модулем упругости (при растяжении и при сдвиге). Возникающие при этом напряжения пропорциональны модулям упругости:

$$\sigma = \varepsilon E; \tau = \gamma G,$$

где ε – относительная деформация при растяжении тела;

γ – относительная деформация при сдвиге.

Под пластичностью понимается способность тела под давлением внешних сил необратимо деформироваться без нарушения сплошности.

Под вязкостью понимается способность тела оказывать сопротивление относительному смещению его слоев:

$$\tau = \eta \dot{\gamma},$$

где $\dot{\gamma} = du / dz$ – скорость деформации;

z – координата по нормали к вектору скорости;

u – линейная скорость элементарного слоя;

du/dz – градиент скорости (интенсивность изменения скорости по нормали к ее вектору).

В пищевой промышленности наибольшее распространение получили шнековые экструдеры, в которых подача материала осуществляется с помощью загрузочной воронки, откуда материал захватывается витками шнека и перемещается им внутри цилиндрического корпуса в предматричную камеру, где постоянно подпрессовывается. Из камеры продукт продавливается через отверстия матрицы.

На рис. 2.40 приведено устройство шнекового экструдера, основными частями которого являются станина, привод, бункер, корпус, шнек, нагревательно-охлаждающая система и комплект сменных матриц.

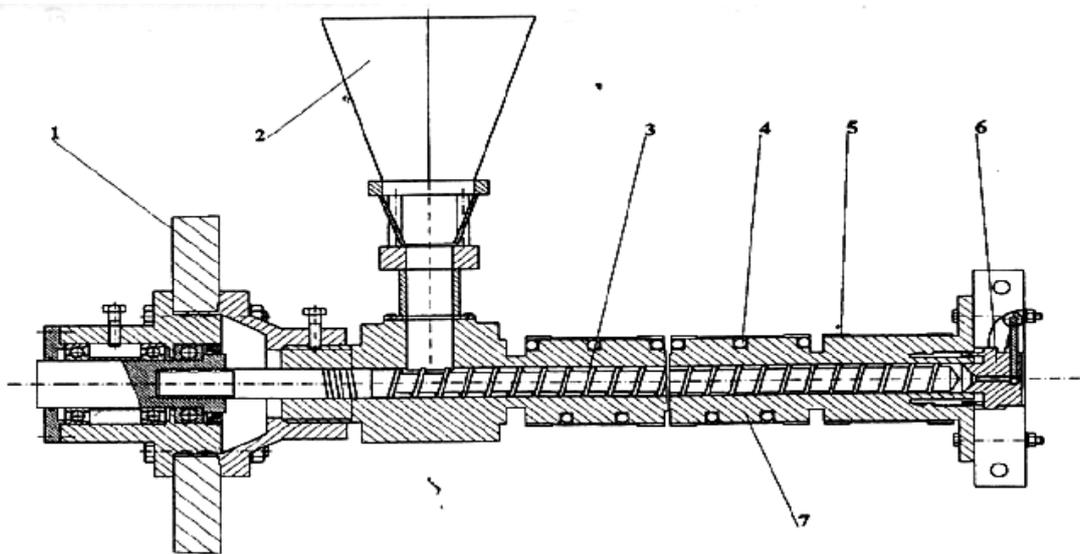


Рис. 2.40. Экструдер со шнековым нагнетателем:
1 – станина; 2 – бункер; 3 – шнек; 4 – система охлаждения;
5 – электронагреватели; 6 – матрица; 7 – корпус

Показателем работы экструдера является расходно-напорная характеристика (рис. 2.41).

Расходно-напорная характеристика формующей части

$$Q_{\phi} = \frac{k_{\phi}}{\mu} \Delta p \cdot 10^{-9},$$

где k_{ϕ} – коэффициент геометрии матрицы, зависящий от формы отверстий;

μ – динамическая вязкость продукта;

Δp – перепад давления, создаваемого экструдером.

Расходно-напорная характеристика нагнетательной части экструдера:

$$Q_n = (k_{H1}\omega - \frac{k_{H2}}{\mu}\Delta p)10^{-9},$$

где k_{h1}, k_{H2} – коэффициенты геометрии шнекового нагнетателя, зависящие от диаметра шнека, длины, ширины и высоты шнекового канала, угла подъема винтовой линии шнека;

ω – угловая скорость вращения шнека.

Производительность экструдера $P = \frac{k_{H1}k_{\phi}}{k_{H1} + k_{\phi}}$.

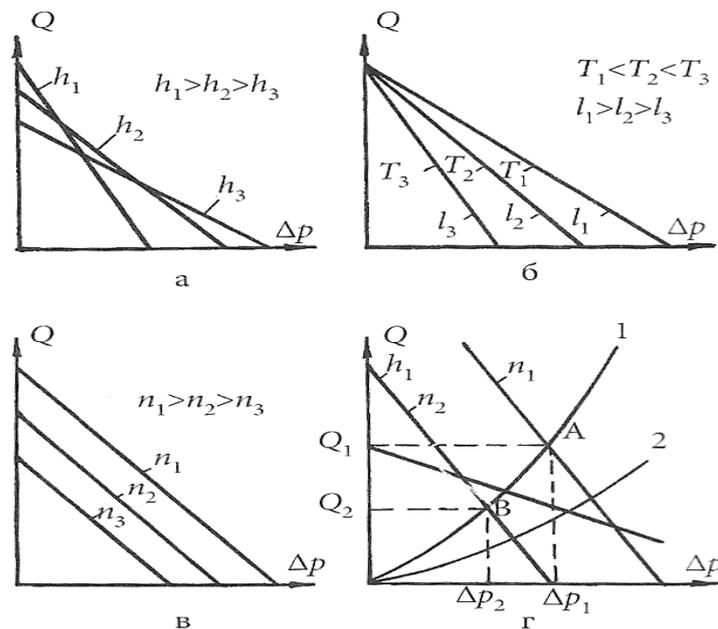


Рис. 2.41. Расходно-напорные характеристики шнекового экструдера

Совместная работа нагнетателя и формирующей матрицы определяется рабочей точкой (точки А и В), которые однозначно определяют параметры режима работы экструдера – его производительность Q_1 и давление Δp_1 с частотой вращения шнека n_1 и соответственно производительность Q_2 и давление Δp_2 для экструдера, работающего при частоте вращения шнека n_2 .

На рис. 2.42 приведен общий вид одношнекового экструдера модели КМЗ-2У, служащего для производства кукурузных палочек.

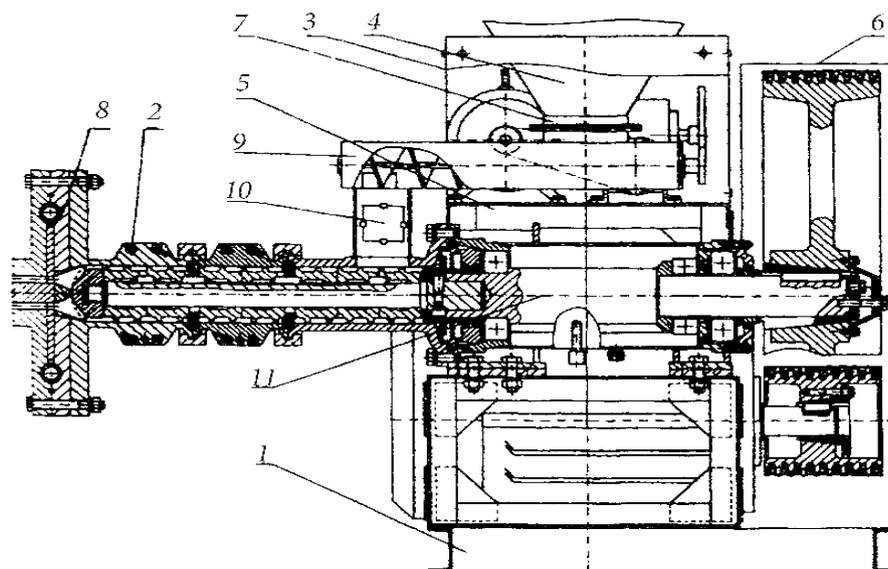


Рис. 2.42. Экструдер КМЗ-2У:

1 – станина; 2 – гильза канала ствола; 3 – корпус; 4 – бункер; 5 – рама; 6 – кожух; 7 – питающий патрубок; 8 – матрица; 9 – шнек питателя; 10 – магнитный уловитель; 11 – ведущий вал

Технические параметры:

производительность, кг/ч	300
частота вращения рабочего шнека, об/мин	365
частота вращения шнека дозатора, об/мин	109
наружный диаметр шнека, мм	123
диаметр отверстия матрицы, мм	14
установленная мощность, кВт	55
габариты, мм	1600x1480x1600
масса, кг	1065

Для отделения жидкости из влажных продуктов служат гидравлические и шнековые прессы (компакторы) или вальцовые отжимные машины. На рис. 2.43 приведен общий вид компактора пищевых отходов.

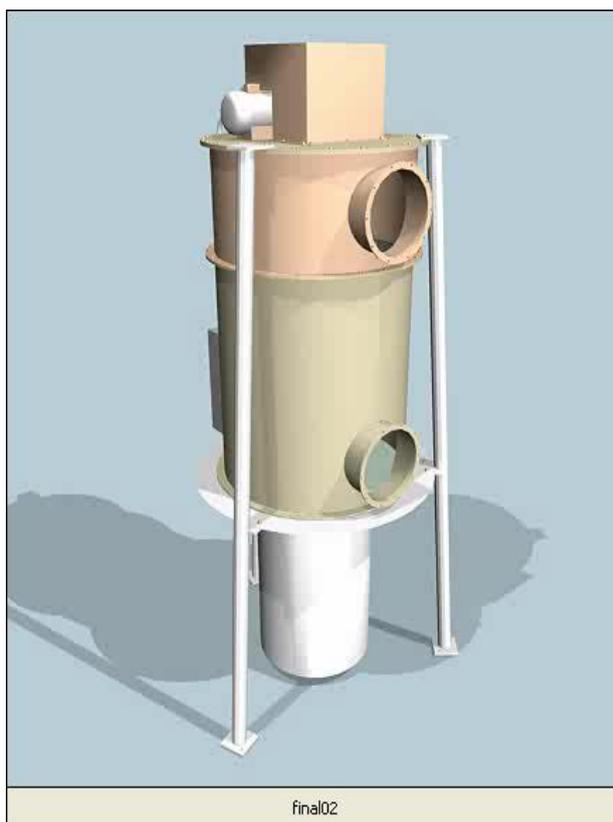


Рис. 2.43. Вертикальный компактор пищевых отходов

Компактор представляет собой одношнековый экструдер с вертикальной компоновкой шнека. Шнек выполнен коническим с переменным шагом витков и заключен в металлическую сетку. Под шнеком установлена многолепестковая диафрагма, служащая для уплотнения прессуемого материала. Перерабатываемый продукт подается через верхний патрубок в зону шнека, где смещается витками шнека к диафрагме. При этом из перерабатываемого продукта попутно извлекается жидкая фракция, которая удаляется через нижний патрубок.

Диафрагма препятствует выходу брикета до тех пор, пока сила давления, развиваемого шнеком, не превысит силы упругости лепестков диафрагмы.

Процесс обработки жидких и пюреобразных пищевых продуктов за счет пропускания под большим давлением с высокой скоростью через узкие кольцевые щели называется *гомогенизацией*. От воздействия на продукт гидродинамических факторов происходит их интенсивная механическая обработка и дробление на более мелкие составляющие.

Гомогенизация изменяет дисперсность частиц продукта и его физико-механические свойства, такие как плотность, вязкость и др.

Процесс гомогенизации осуществляется на специальных аппаратах, называемых *гомогенизаторами*. Они подразделяются на клапанные, дисковые и ультразвуковые.

Основным конструктивным элементом клапанного гомогенизатора, наиболее распространенного в промышленности, является число плунжеров (1...5).

На рис. 2.44 приведена схема клапанного гомогенизатора, который состоит из станины, корпуса, кривошипно-шатунного механизма, гомогенизирующей головки, системы охлаждения и смазки и привода.

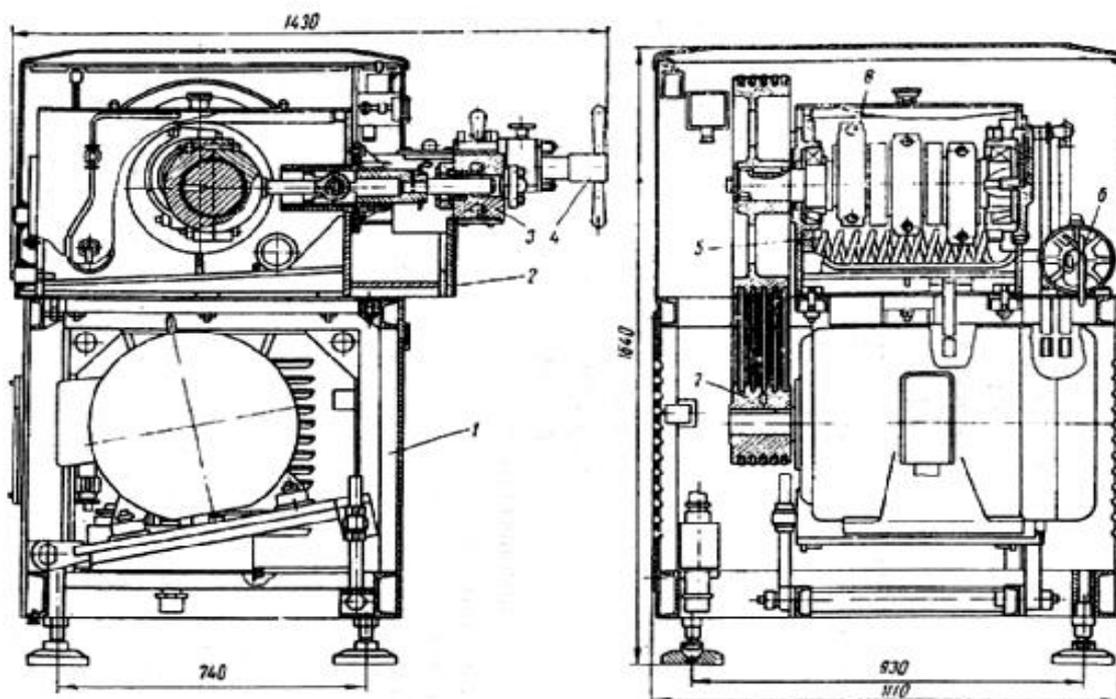


Рис. 2.44. Общий вид гомогенизатора:

1 – станина; 2 – корпус; 3 – плунжерный блок; 4 – головка гомогенизирующая; 5 – система охлаждения; 6 – система смазки; 7 – привод; 8 – кривошипно-шатунный механизм

Кривошипно-шатунный механизм преобразует вращательное движение клиноременной передачи в возвратно-поступательное движение плунжеров. На коленчатом валу кривошипно-шатунного механизма установлен ведомый шкив и шатуны. Вал вращается в конических роликовых подшипниках.

Система охлаждения содержит патрубков для подвода и отвода воды, трубчатый змеевик и трубки с отверстиями, установленные под плунжерами.

Основным рабочим органом гомогенизатора является гомогенизирующая головка, которая является диспергатором обрабатываемой среды. К ее основным элементам относятся седло и клапан, оказывающие непосредственное влияние на дисперсность частиц. Клапанная щель, образуемая между седлом и клапаном в зависимости от их конструктивного исполнения, может быть гладкой или волнистой с постоянным или переменным сечением.

Продукт подается насосом под большим давлением до 20 МПа. Сила давления поднимает клапан, между ним и седлом образуется щель, через которую продавливается жидкий продукт. Клапан находится над седлом в плавающем состоянии, поскольку из-за изменения гидродинамических условий его положение постоянно меняется.

Силовое замыкание клапана обеспечивается пружиной, жесткость которой определяется в зависимости от давления подачи продукта.

Степень измельчения зависит от давления, конструкции гомогенизирующей головки, равномерности подачи продукта, состояния и качества предварительной обработки продукта.

По конструкции головки делятся на одно-, двух- и многоступенчатые.

Двухступенчатая головка (рис. 2.45) состоит из корпуса и клапанного механизма. В клапанный механизм входят седло и клапан. Клапан связан со штоком, на выступ которого воздействует пружина. Сила пружины регулируется перемещением гайки.

Производительность плунжерного гомогенизатора:

$$P = 0,25D^2 S \omega z \eta_n,$$

где D, S – диаметр и ход плунжера соответственно;

ω – угловая скорость вращения коленчатого вала;

z – число плунжеров;

η_n – КПД насоса.

Мощность двигателя гомогенизатора:

$$N = \frac{P \cdot p}{3600\eta},$$

где p – давление гомогенизации;

η – КПД гомогенизатора.

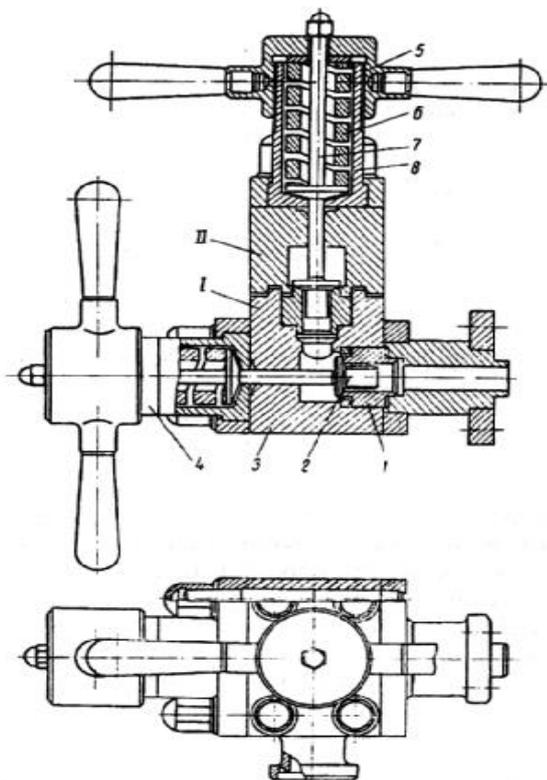


Рис. 2.45. Гомогенизирующая головка:

I – первая ступень; II – вторая ступень;

1 – седло клапана; 2 – клапан; 3 – корпус; 4 – нажимное устройство; 5 – накидная гайка; 6 – пружина; 7 – шток; 8 – стакан

Средний диаметр жировых шариков в диапазоне давления от двух до двадцати мегапаскалей (для молочных продуктов):

$$\bar{d} = 3,8 \cdot 10^{-6} / \sqrt{p}.$$

Обработка давлением используется для получения свежеприготовленного сока из плодов и ягод непосредственно перед употреблением. Для этой цели используются соковыжималки, выпускаемые в качестве насадок к мясорубкам. Эти насадки работают по принципу создания давления конусным шнеком, постепенного сжатия продукта и продавливания жидкой фракции через отверстия сита. Степень уплотнения продукта зависит от конусности шнека,

шага между витками и угла их подъема. Данный способ получения сока характерен для большинства соковыжималок.

Обработка давлением пластичных и вязкоупругих пищевых сред. Раскатывание куска или толстой ленты теста относится к важным операциям процесса получения тестовых полуфабрикатов. Операция раскатывания широко используется в производстве печенья, крекеров, пиццы, пельменей, лапши и др.

При раскатывании, когда тесто неоднократно проходит через тестовальцовочную установку, в пласте возникают осциллирующие напряжения и возникают те же эффекты, что и при вымешивании, т.е. недомес, оптимальное развитие, перемес. Считается оптимальным, если кусок теста подвергается не более 40 раскатываниям, при большем их числе происходит обминка теста и качество его ухудшается.

Рассмотрим модель процесса деформирования теста валками тестораскатывающей машины (рис.2.46), установленными в каретке, которая совершает возвратно-поступательное движение относительно подаваемой транспортером тестовой массы. В данной модели суммарная деформация пласта от действия внешних сил может быть представлена как суперпозиция деформаций растяжения, сжатия и сдвига.

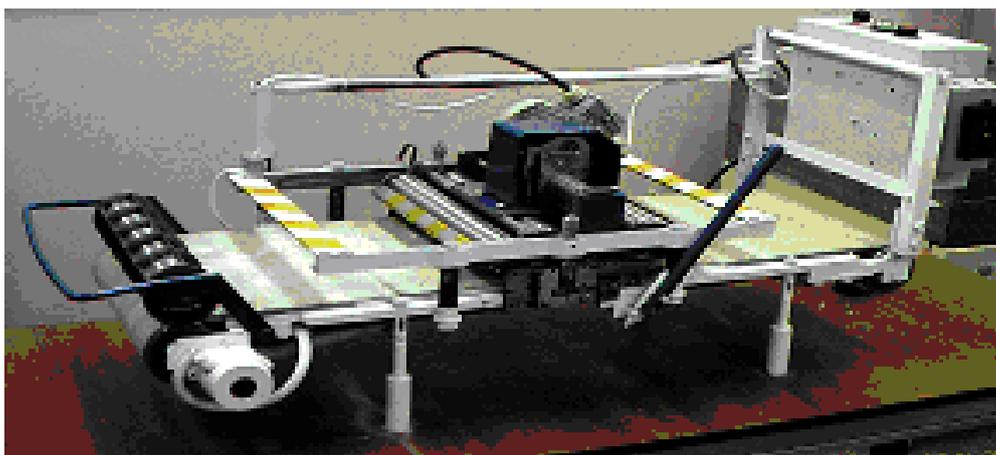


Рис. 2.46. Общий вид тестораскатывающей формирующей установки

Каретка (рис.2.47), перемещаясь возвратно-поступательно относительно конвейера, автоматически по заданной программе выбирает зазор между образующими валиков и плоскостью транспортера до тех пор, пока не будет

достигнута заданная толщина пласта.

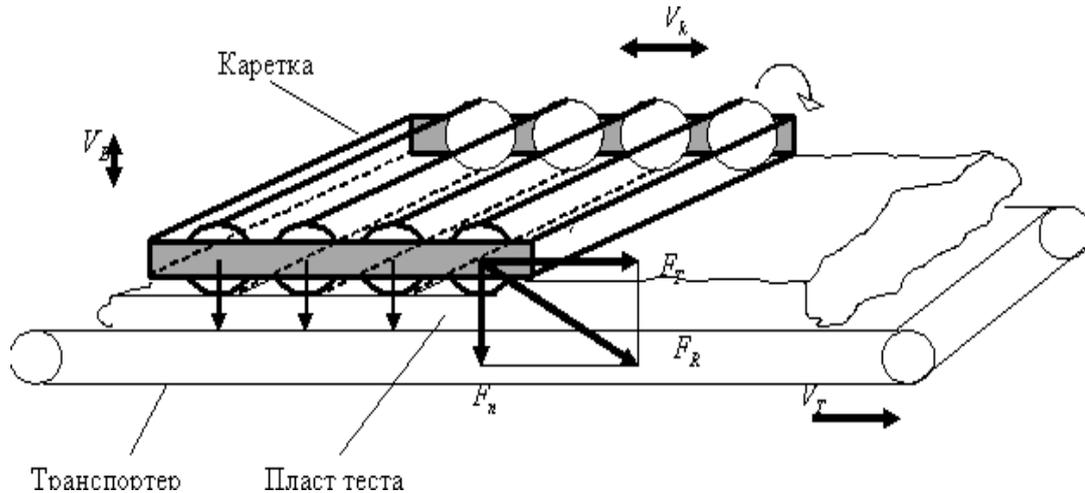


Рис.2.47. Схема раскатки пласта теста на четырехвалковой тестораскатывающей установке

В результате этих движений каретки на пласт будет действовать нормальная сила (сила сжатия), возникающая при опускании каретки в вертикальной плоскости, и сдвига, возникающая при возвратно-поступательном ее движении в горизонтальной плоскости. Данная комбинация сил (без учета массовых сил) собственно и определяет деформацию куска теста, заставляя его изменять свои размеры по всем координатным плоскостям.

От действия внешней нагрузки внутри текстовой массы будут возникать нормальные и касательные напряжения, величина которых будет зависеть не только от величины внешних сил, но и ориентации площадок, на которых действуют внутренние силы.

Выделим в зоне контакта вала с деформируемым пластом теста элементарный участок в виде призмы (рис.2.48) и рассмотрим действующие на него силы. X -компонента силы состоит из пяти частей для каждой грани призмы, однако, если Δz мало, то силы от треугольных граней (перпендикулярные оси z) будут равны и противоположны по направлению. На основание призмы действует сила равная $\Delta F_{xz} = S_{xy} \Delta x \Delta y$, а на вертикальную прямоугольную грань — $\Delta F_{x1} = S_{xx} \Delta y \Delta z$. Сумма всех этих сил равна X -компоненте внешней силы, действующей на грань N с единичным вектором

нормали n к этой грани, $\Delta F_{xn} = S_{xx}\Delta y\Delta z + S_{xy}\Delta x\Delta z$.

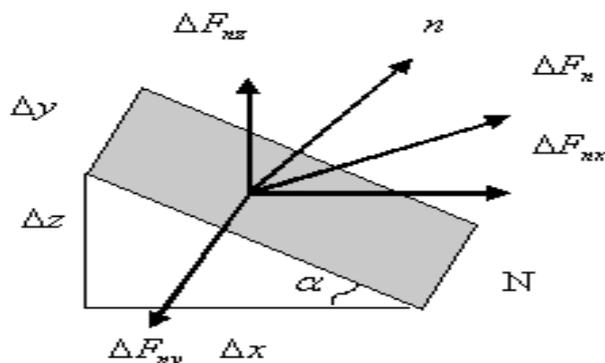


Рис. 2.48. Схема силового воздействия на элементарный участок пласта

Составляющая напряжения по оси X равна $\frac{\Delta F_{xn}}{\Delta z \cdot \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}}$ или

$$S_{xn} = S_{xx} \frac{\Delta y}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}} + S_{xy} \frac{\Delta x}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}}, \quad \text{где} \quad \frac{\Delta y}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}} = \cos \alpha = n_y, \quad \text{а}$$

$$\frac{\Delta x}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}} = \sin \alpha = n_x. \quad \text{Тогда} \quad S_{xn} = S_{xx}n_x + S_{xy}n_y \quad \text{или} \quad S_{in} = \sum_j S_{ij}n_j.$$

Движение слоя теста между лентой конвейера и валками каретки при постоянно уменьшающемся зазоре обуславливает не только появление в тестовой массе напряжений сдвига, но и напряжений от сжатия пласта. Величина давления на пласт возрастает от нуля в момент касания образующей валка поверхности пласта, достигает максимума при минимальной величине зазора и вновь уменьшается до нуля, когда валок выходит из контакта с тестом.

При контакте последующих валков каретки в течение одного хода происходит калибрование толщины пласта с выравниванием и перераспределением напряжений.

Поскольку каретка совершает периодические возвратно-поступательные движения в процессе раскатывания теста и количество ходов каретки для нормального развития теста должно составлять примерно 36...40, то такой динамический режим работы тестораскатывающей машины может быть представлен моделью осциллирующих напряжений, вызванных периодическими колебаниями деформации пласта. Предположим, что

деформация в пласте изменяется по гармоническому закону:

$$\gamma(t) = \gamma_0 \exp(i\omega t),$$

где $e^{i\omega t} = \cos(\omega t) + i \sin(\omega t)$;

$\omega = 2\pi f$ – частота колебаний, рад/с;

f – частота в Гц;

γ_0 – амплитуда гармонических колебаний деформации.

Периодические колебания деформации будут приводить к изменениям напряжений, которые в общем случае будут равны:

$$\tau(t) = G_0 \gamma(t) + \tau_0 \exp[i(\omega t + \delta)],$$

где τ_0 – амплитуда периодически изменяющихся напряжений;

G_0 – мгновенный модуль сдвига;

δ – угол, характеризующий отставание напряжений от деформации.

Величина амплитуды деформации оказывает существенное влияние на целостность структуры раскатываемого пласта теста. Экспериментальные исследования показывают, что при значительном уменьшении зазора при каждом ходе каретки в начальный момент раскатывания бруска теста, когда толщина бруска превышает зазор более чем в три раза, наблюдается образование разрывов тестовой массы по краям пласта, т.е. происходит разрушение структуры пласта. Это объясняется тем, что скорость деформации является чрезмерной, и напряжения в пласте быстро достигают критических величин. Данное явление особенно четко проявляется при раскатывании песочного теста, реологические свойства которого отличаются от вязкоупругих тел. Поэтому изменение зазора каретки должно осуществляться как можно более плавно и раскатывание должно вестись в несколько проходов с двух-трех кратным повторением ходов каретки с неизменяемым зазором для калибрования пласта.

Из-за наличия остаточных напряжений толщина пласта после раскатки не является его конечной величиной. Фактическая толщина пласта будет больше, чем толщина на выходе из тестораскатывающей машины, так как пласт после

релаксации напряжений увеличит свою толщину. Соотношение конечной величины к зазору между вальцами или между вальцом и поверхностью транспортера может быть выражено следующей зависимостью:

$$B_B / B_0 = 0,06 \left(\frac{B_0}{2R} \right)^{-0,58} + 1.$$

Данное эмпирическое уравнение связывает только геометрические параметры тестораскатывающей установки и не учитывает реологические свойства теста.

В процессе раскатывания нарушается структура белковой сети. Ориентирование белка является причиной анизотропии вальцованного теста. Раскатывание приводит к меньшей растяжимости теста и пониженной эластичности. Потеря прочности теста, очевидно, связана с накоплением деформации сдвига, поскольку работа тестовальцовочных машин основана на приложении срезающих напряжений к тесту.

Получение тестовой ленты для ее последующего раскатывания может быть осуществлено путем экструдирования, т.е. продавливания тестовой массы через отверстия матрицы экструдера. Процесс формования экструзией имеет ряд преимуществ, например, таких как непрерывность и высокая скорость процесса, безотходность технологии.

При штамповании полуфабрикатов из полученной ленты или пласта теста заготовки испытывают деформацию сжатия от действия давления. Тесто обладает упруговязкими свойствами, когда упругость его проявляется до определенного предела, после чего тесто начинает деформироваться и течь, проявляя свойства вязкой жидкости. Это течение не подчиняется закону Ньютона для истинно вязких жидкостей и его реологические свойства описываются моделью Бингама:

$$F_\tau / S = \mu \frac{d\omega}{dy} + \tau_0,$$

где F_τ – тангенциальная сила, вызывающая сдвиг слоев площадью S ;

τ_0 – напряжение сдвига;

$d\omega/dy$ – градиент скорости.

Для тестовых полуфабрикатов характерно явление релаксации, т.е. уменьшения величины напряжений в тестовой заготовке при постоянной деформации. Время релаксации или ее период характеризует физико-механические свойства материала. Например, для некоторых рецептов бисквитного теста период релаксации изменяется от 1.5 до 6 секунд. Практикой установлено, что для сохранения рельефного рисунка на отштампованной тестовой заготовке время штамповки не должно превышать периода релаксации.

Различие в физико-механических характеристиках теста, полученного из различных видов муки, предопределяет и различную технологию получения тестовых полуфабрикатов. Например, пшеничное тесто представляет собой коллоидную систему в виде каркаса из клейковины, заполненного крахмальными зёрнами и вследствие этого обладающую упругими свойствами, что делает его пригодным для штамповки. Тогда как тесто из ржаной муки не имеет клейковинного каркаса, обладает меньшей вязкостью и большей адгезией. Поэтому формовка ржаного теста ограничивается округлением тестовых заготовок.

2.6. Процессы транспортирования пищевых материалов

В процессе проектирования новых технических систем пищевых производств приходится рассматривать большой круг задач механики, в том числе не только с механическими процессами обработки пищевого сырья и полуфабрикатов, но и с процессами транспортирования пищевых сред.

Транспортирование пищевых материалов может происходить при различных условиях, например, в свободном потоке в рабочих зонах машин, различных каналах и трубопроводах или путем медленного перемещения больших масс в накопителях, бункерах, силосах и т.п. под воздействием различных внешних сил, изменяющихся по определенным закономерностям.

При решении этих задач используются известные уравнения теории свободного движения тела, а в соответствующих случаях соотношения механики сплошных сред.

Известные дифференциальные уравнения движения центра тяжести свободной частицы постоянной массы в прямоугольной системе координат в случае неподвижной среды имеют вид:

$$\begin{aligned} m \frac{d^2x}{dt^2} &= -R \cos \alpha \\ m \frac{d^2y}{dt^2} &= -R \sin \alpha - G \end{aligned},$$

где x, y – координаты точек траектории движения;

m – масса движущейся частицы;

R – сила сопротивления среды;

$G = mg$ – сила тяжести;

α – угол наклона к горизонту касательной к траектории движения.

Из данных уравнений вытекают следующие свойства элементов траектории движения частицы:

- если угол $\alpha \neq \pi/2$, то скорость движения ни в одной точке траектории не равна нулю;
- угол наклона касательной к траектории α уменьшается по мере движения частицы вдоль траектории;
- горизонтальная скорость движения частицы убывает по мере продвижения ее вдоль траектории;

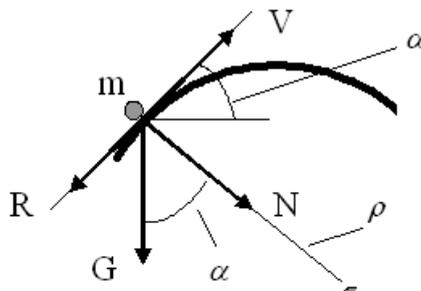


Рис.2.49. Силы, действующие на частицу на участке траектории с кривизной ρ

– кривизна траектории (рис.2.49) равна $\frac{1}{\rho} = \frac{g \cos \alpha}{V^2}$;

– для одной и той же ординаты на восходящем и нисходящем участках траектории ее элементы связаны следующими неравенствами; $V_{\text{ВОС}} > V_{\text{НИС}}$;

$$V_{x\text{ВОС}} > V_{x\text{НИС}}, \quad \alpha_{\text{ВОС}} < \alpha_{\text{НИС}}, \quad \frac{dV_{\text{ВОС}}}{dt} > \left| \frac{dV_{\text{НИС}}}{dt} \right|.$$

Сопротивление среды движению частицы можно рассматривать как функцию от скорости ее движения $R = R(V)$. Если кривая изменения скорости в зависимости от сопротивления среды не имеет перегибов, т.е. если $\frac{d^2 R(V)}{dV^2} \neq 0$ ни на одном из участков, то закон изменения сопротивления среды от скорости будет монотонным.

По Ньютону сопротивление среды движению тела подчиняется квадратичному закону:

$$R = bV^2,$$

где b – коэффициент, характеризующий свойства среды и тела.

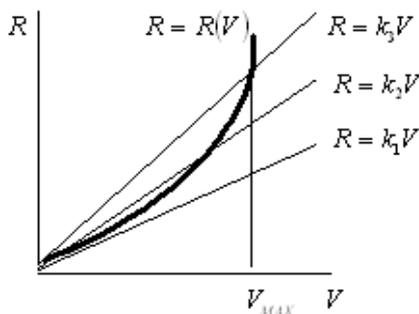


Рис. 2.50. Аппроксимация квадратичного закона сопротивления среды линейным законом

Любой закон сопротивления среды в определенном диапазоне изменения скоростей можно заменить линейным законом (рис.2.50), условия применимости которого при определении элементов траектории записывается в виде:

$$\frac{L_R - L_1}{L_R} \cdot 100\% \leq [p],$$

где L_R, L_1 – численные значения рассматриваемого элемента (скорости, времени,

длины дуги траектории и пр.) при действительном и линейном законах сопротивления среды;

[p]– допустимый процент ошибки.

Условия движения частицы при линейном законе сопротивления среды.

Из решения дифференциального уравнения $\frac{dV_x}{dt} = -\frac{R \cos \alpha}{m}$ при $R = aV$ и начальных условиях $t = 0$, $V_x = V_{x0}$, $\alpha = \alpha_0$ следует $V_x = V_{x0} \exp(-a_1 t)$, где $a_1 = a/m$.

Абсцисса траектории $x = \frac{V_{x0}}{a_1} [1 - \exp(-a_1 t)]$.

Ордината траектории $y = \frac{V_{x0} \cdot Q}{a_1} [1 - \exp(-a_1 t)] - \frac{gt}{a_1}$, где $Q = tg \alpha + \frac{g}{a_1 V_{x0}}$.

Условия движения частицы при квадратичном законе сопротивления среды

При квадратичном законе сопротивления среды $R = bV^2$ (при аргументе t) из решения уравнения

$$\frac{dV_x}{dt} = -\frac{b_1 V_x^2}{\cos \alpha},$$

где $b_1 = b/m$ при начальных условиях $t = 0$, $V_x = V_{x0}$;

следует, что $V_x = \frac{1}{\frac{1}{V_{x0}} + b_x t}$, где $b_x = b_1(1/\cos \alpha)$.

$$V_y = \left(\frac{1}{V_{x0}} + b_x t \right) \left[tg \alpha_0 - gt \left(\frac{1}{V_{x0}} + \frac{b_x t}{2} \right) \right].$$

Длина дуги траектории $S = \frac{1}{b_x} \ln \left[V_{x0} \left(\frac{1}{V_{x0}} + b_x t \right) \right]$.

Анализ движения частицы при боковом направлении воздушного потока.

В некоторых технологических процессах, например, процессах разделения частиц на фракции, может иметь место свободное движение частиц в движущемся воздушном потоке.

Рассмотрим задачу движения частицы при боковом движении воздушного потока при допущении, что скорость этого потока ω_z будет постоянной на всей траектории движения частицы.

Полная скорость движения частицы будет равна:

$$V^2 = V_x^2 + V_y^2 + (V_z + \omega_z)^2 \text{ или } V^2 = \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt} + \omega_z\right)^2.$$

Дифференциальные уравнения движения:

$$\left. \begin{aligned} md^2x/dt^2 &= -R \cos\alpha \\ md^2y/dt^2 &= -R \sin\alpha - g \\ md^2z/dt^2 &= -R \cos\beta \end{aligned} \right\}.$$

Разделив почленно первое и третье уравнения, получим $d^2x/d^2z = dx/(dz - \omega_z dt)$, решение которого дает значение искомой величины $z = \omega_z(t - x/V_{x0})$.

С помощью этой формулы можно определить отклонение траектории движения частицы в случае бокового направления воздушного потока при $\omega = const$. Можно видеть, что при боковом направлении воздушного потока боковое отклонение частицы зависит от скорости потока ω_z , сносящего частицу, абсциссы траектории x , горизонтальной компоненты начальной скорости частицы V_{x0} и времени движения t . Влияние аэродинамических свойств среды и частицы на величину ее отклонения косвенно учитывается величиной x .

Анализ движения частиц материала по трубопроводу. Рассмотрим условия движения частицы твердого материала по трубопроводу прямоугольного сечения, нижняя плоскость которого установлена под наклоном к линии горизонта (рис.2.51).

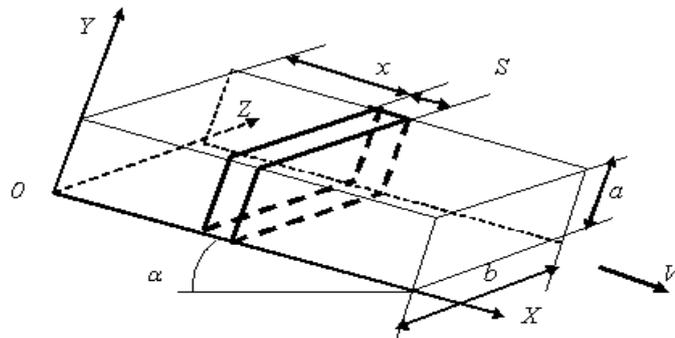


Рис.2.51. Схема участка трубопровода

Будем считать, что масса транспортируемых по трубопроводу частиц, проходящая в единицу времени через любое сечение трубопровода равна:

$$\sum m_i = \rho(x) \cdot S(x) \cdot V(x) = const,$$

где $V(x)$ – скорость воздушного потока в трубопроводе;

$\rho(x)$ – плотность потока частиц.

На отдельную частицу массой m_i действуют сила тяжести G , сила сопротивления среды R , направленная под углом β к оси OY , сила трения F_T и сила реакции N (рис. 2.52)

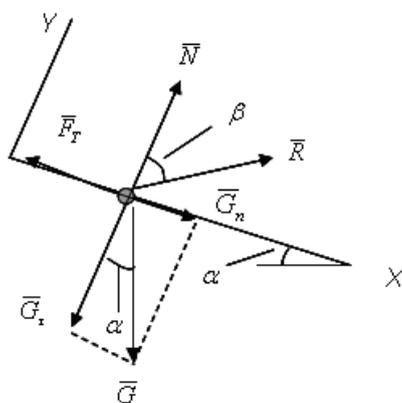


Рис.2.52. Схема сил, действующих на частицу материала

Уравнение движения частицы в проекциях на оси OX и OY :

$$-M(dV_x/dt) = G \sin \alpha + R \sin \beta - F_T,$$

$$-M(dV_y/dt) = R \cos \beta + N - G \cos \alpha,$$

где $M = \sum m_i$; $G = Mg$; $R_x = C_x s (\rho_1/2)(V_{\Pi} - V_x)^2$; $R_y = C_y S (\rho_1/2)V_y^2$; $F_T = C_T S_T (\rho_1/2)(V_{\Pi} - V_x)^2$;

C_x, C_y – аэродинамические коэффициенты;

ρ_1 – плотность воздушного потока;

$V_{\Pi} - V_x$ – относительная скорость движения потока и частицы;

S, S_T – площадь миделевого сечения частицы и ее поверхности

соответственно.

Предельная скорость частиц будет равна:

$$V = \sqrt{(V_{\Pi} - V_x)^2 + V_y^2} = \frac{\sqrt{g}}{QB} \sqrt{B^2 \sin \alpha + Q^2 [\cos \alpha - (N/gM)]},$$

где $B^2 = C_y S \rho_1 \cos \beta / 2M$ и $Q^2 = [(\rho_1 / 2M)(C_T S_T - C_x S \sin \beta)]$.

Процессы транспортирования сыпучих материалов реализуются в пневмосистемах крупных хлебокомбинатов (рис.2.53).

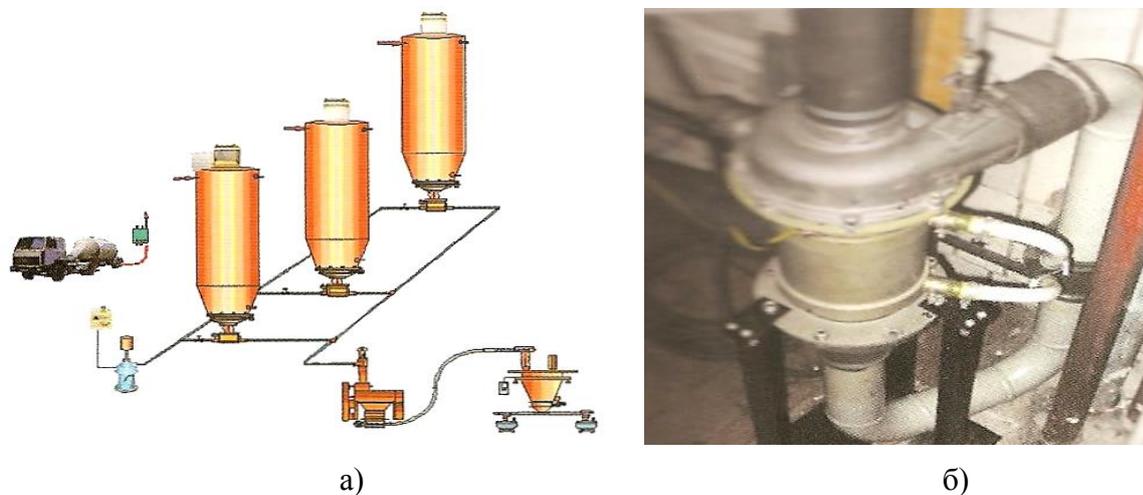


Рис. 2.53. Схема пневмосистемы транспортирования муки (а) и побудитель тяги (б)

Распределение сыпучих материалов по емкостям.

Для распределения смеси сыпучих материалов по емкостям, перемещаемой воздушным потоком по трубопроводу, используются широко известные двухпозиционные распределители, которые представляют собой управляемую заслонку (клапан), перекрывающий центральный трубопровод или отвод к данной емкости. Эти устройства просты по конструкции и высоко надежны, однако их использование оправдано, если число емкостей не более двух. При большем числе емкостей перед каждой необходимо устанавливать такой распределитель, что усложняет управление системой транспортирования и распределения сыпучих материалов по емкостям, делает ее громоздкой, энерго- и металлоемкой.

Более эффективной конструкцией распределителя является мехатронное многопозиционное устройство распределения сыпучих материалов, позволяющее обслуживать от 2 до 12 емкостей по их запросам или по обегавшей системе. Это устройство содержит мальтийский крест, число позиций которого равно числу обслуживаемых емкостей, соединенных с ним трубопроводами. Сигнал датчика уровня емкости заставляет срабатывать

привод поводка мальтийского механизма, и патрубков центрального трубопровода позиционируется мальтийским крестом относительно трубопровода обслуживаемой емкости (рис.2.54).

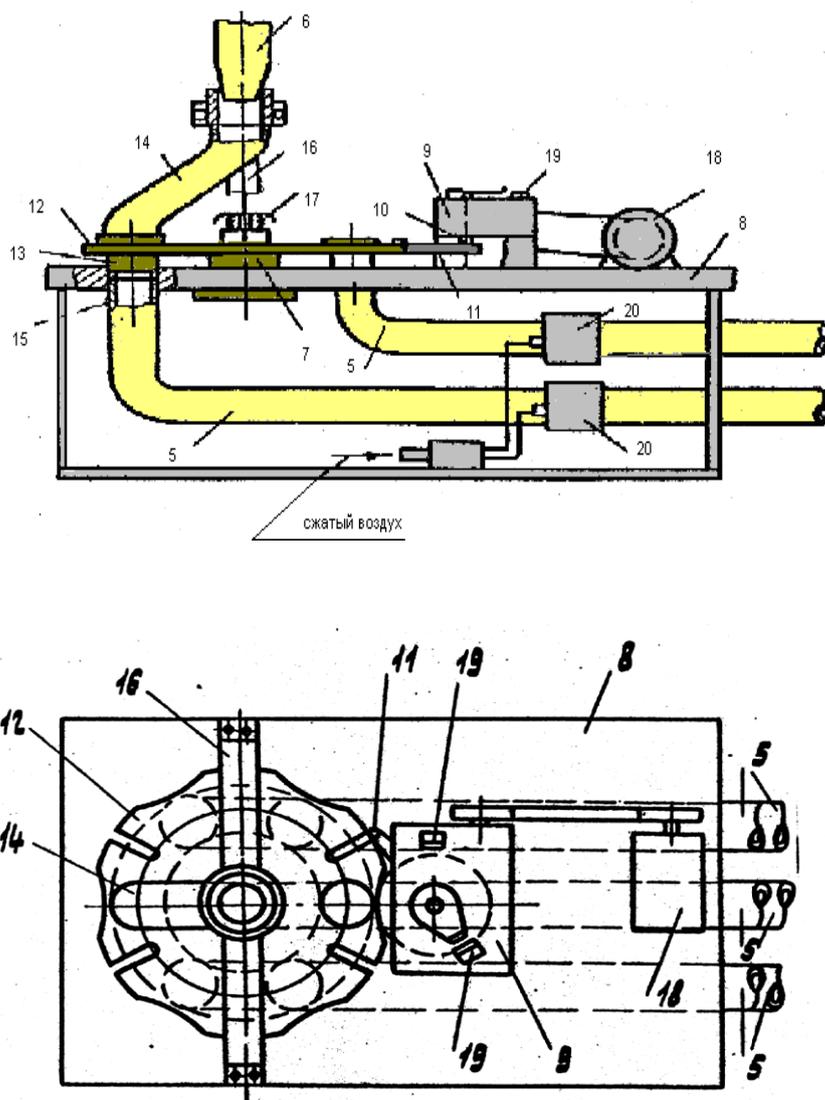


Рис. 2.54 Схема многопозиционного устройства распределения сыпучих материалов по емкостям:

5, 15 – трубопроводы к емкостям; 6 – центральный трубопровод; 7 – основание мальтийского креста; 8 – платформа; 9 – редуктор; 10 – поводок; 11 – ролик поводка; 12 – мальтийский крест; 13 – втулка; 14 – патрубок; 16 – кронштейн; 17 – пружина; 18 – электродвигатель; 19 – датчик положения; 20 – эжектор

Анализ движения материала в вертикальном бункере.

Рассмотрим процесс движения массы материала, состоящего из отдельных частиц, в вертикальном бункере, которые подаются в него по

трубопроводу с помощью воздушного потока (рис.2.55).

Материал, подаваемый в бункер, обладает упругими свойствами, и в процессе заполнения бункера возникают боковые и осевые усилия. Величину давления на стенки бункера можно принять как часть осевого давления столба материала в бункере:

$$q = kp,$$

где q – боковое давление материала;

p – осевое давление материала;

k – коэффициент пропорциональности.

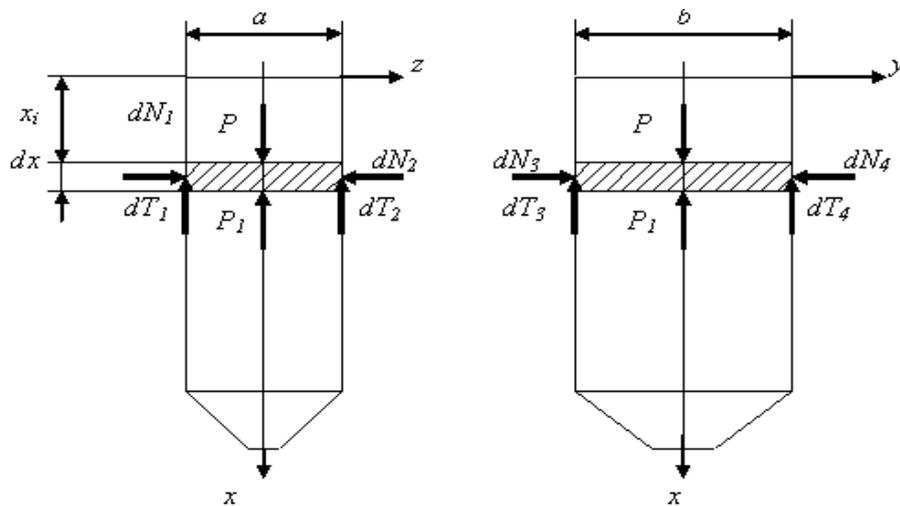


Рис.2.55. Схема действующих сил на материал в бункере

Определим зависимость, характеризующую изменение осевого давления по высоте бункера накопителя, в предположении, что нормальные напряжения в любой точке сечения материала перпендикулярного оси x одинаковы и давление воздушного потока равномерно распределяется по плоскости сечения бункера.

Выделим на расстоянии x_i от начала координат элементарный слой материала толщиной dx . Площадь сечения бункера $s = ab$, где a, b - размеры сечения бункера. Выделенный элемент представляет собой параллелепипед с основаниями равными $s_1 = s_2 = ab$ и боковыми гранями $ds_3 = ds_4$ и $ds_5 = ds_6$. На выделенный элемент оказывают действие следующие силы:

– сила давления воздушного потока $P = ps_1 = C_x \frac{\rho_B}{2} V^2 s_1$,

где ρ_B – плотность воздушного потока;

C_x – аэродинамический коэффициент;

V – скорость воздушного потока;

– сила реакции $P_1 = (P + dP)s_2 = (p + dp)s_2$;

– силы нормального давления $dN_i = kpd s_i$, ($i = 3, 4, 5, 6$);

– силы трения материала о стенки $dT_i = f k p d s_i$, ($i = 3, 4, 5, 6$);

– сила тяжести $G = mg = \rho_M v g$,

где v – объем элемента, $v = s_2 dx$.

Уравнение равновесия относительно оси x :

$$P - P_1 - \sum_3^6 dT_i = 0.$$

Разделив переменные и решив уравнение, получим

$$p_x = p_0 \exp\left(-\frac{2x f k (a+b)}{ab}\right).$$

При $x = h$ давление будет равно:

$$p = \exp(-Qh) + M,$$

где h – высота бункера накопителя;

$$Q = \frac{2fk(a+b)}{ab};$$

M – объемная масса материала в бункере.

Условные обозначения:

I – момент инерции рабочего органа измельчителя.

k – коэффициент восстановления материала после ударного воздействия рабочего органа измельчителя.

J – импульс ударного воздействия.

A – полная работа внешних сил при дроблении материала.

D – степень дисперсности материала при измельчении.

P – производительность (пропускная способность) машины или аппарата.

ρ – плотность материала.

ω – угловая частота вращения.

N – установленная мощность двигателя привода.

F_r – фактор разделения материала при протирании.

R – сила воздушного сопротивления при движении частицы.

$H(v)$ – полнота смешивания.

$K_{cm}(v)$ – коэффициент смешивания.

$S^2(\alpha_f)$ – дисперсия фактической доли компонента α_f в пробе смеси объема v единиц.

$E(p_i)$ – энтропия смеси.

K_0 – коэффициент однородности смеси.

N_{KP} – порог связности частиц из одного вида материала в смеси компонентов.

\bar{d} – средний диаметр жировых шариков при гомогенизации молока.

Q_ϕ – расходно-напорная характеристика формующей части экструдера.

Q_H – расходно-напорная характеристика нагнетающей части экструдера.

ω_z – скорость бокового движения частицы при ее транспортировании.

p – осевое давление материала в бункере.

q – боковое давление материала в бункере.

σ – нормальное напряжение.

τ – касательное напряжение.

E – модуль упругости.

ε – деформация растяжения.

μ – вязкость материала.

Глоссарий

Измельчение – механический процесс образования новых поверхностей частиц материала путем их дробления.

Диспергирование – процесс измельчения частиц до коллоидной степени дисперсности.

Протирание – механический процесс отделения массы сырья путем его продавливания через сито.

Финиширование – процесс тонкого измельчения протертой массы продавливанием через сито с небольшими отверстиями.

Гомогенизация – процесс измельчения жидких и пастообразных продуктов при их пропускании под давлением через узкие щели.

Грубодисперсные системы – системы с частицами дисперсной фазы менее 10^{-3} см.

Микрогетерогенные системы – системы с частицами дисперсной фазы $10^{-3} \dots 10^{-5}$ см.

Ультрамикрогетерогенные системы – системы с частицами дисперсной фазы $10^{-5} \dots 10^{-7}$ см.

Дисперсионная среда – сплошная часть неоднородных дисперсных систем.

Дисперсная фаза – входящая в качестве содержимого в дисперсную систему.

Конденсация – укрупнение частиц до коллоидной степени дисперсности.

Сортирование – механический процесс разделения сыпучих материалов на фракции, различающиеся качеством частиц.

Калибрование – механический процесс разделения сыпучих материалов на фракции, различающиеся величиной частиц.

Проход – часть сыпучего материала, прошедшая через отверстия сита при сортировании.

Сход – часть сыпучего материала, не прошедшая через отверстия сита при сортировании.

Самосортирование – процесс перемещения частиц с меньшими размерами и коэффициентом трения из верхних слоев в нижние.

Смешивание – механический процесс, заключающийся в обеспечении

равномерного распределения компонентов смеси в общем ее объеме в соответствии с заданным долевым участием компонентов.

Конвективное смешивание – процесс перемещения групп частиц из одного объема смеси в другой внедрением и скольжением слоев.

Диффузионное смешивание – процесс перемещения частиц различных компонентов через вновь образуемые границы их раздела.

Сегрегация – группирование близких по форме и размерам частиц в разных местах смесителя.

Связность частиц – контактирование соседних частиц из одного вида материала друг с другом.

Слоистость частиц – контактирование частиц из одного вида материала друг с другом по горизонтали.

Струйность частиц – контактирование частиц из одного вида материала друг с другом по вертикали.

Показатель полноты смешивания – отношение отклонения реального состава смеси от заданного в разных объемах смеси.

Денатурация – негидролитическое изменение нативной (первоначальной) структуры белка вследствие механического, химического или теплового воздействия.

Синерезис – самопроизвольный процесс разделения продукта на две фазы, сопровождаемый изменением его объема.

Коагуляция – процесс взаимофиксации выведенных из состояния агрегативной устойчивости частиц дисперсной фазы, проявляющийся в самоукрупнении коллоидных частиц.

Предел текучести – предел напряжения сдвига, при котором возникает течение материала.

Ньютонова жидкость – жидкие продукты, у которых коэффициент вязкости есть постоянная величина, т.е. когда скорость деформации жидкой среды пропорциональна напряжениям сдвига.

Плотность продукта – характеристика физико-механических свойств

продукта, равная отношению его массы к единице объема.

Прочность продукта – способность сопротивления материала противодействовать механическому разрушению.

Упругость продукта – способность материала мгновенно восстанавливать свою форму после снятия внешней нагрузки.

Эластичность – способность продукта восстанавливать форму через некоторый промежуток времени после снятия нагрузки.

Пластичность – свойство продукта, характеризующееся получением необратимой деформации при определенной величине нагрузки.

Релаксация – свойство продукта, характеризующее время перехода упругой деформации в пластическую при постоянной нагрузке.

Вязкость – характеристика внутреннего трения, возникающего при относительном движении слоев жидких продуктов.

Адгезия – способность проявления связей продукта с рабочим органом, тарой или с другим продуктом.

Контрольные вопросы

1. Какие существуют механические способы измельчения материалов?
2. По каким признакам классифицируют продукты по степени измельчения?
3. Что понимается под степенью измельчения?
4. На что затрачивается работа при измельчении материала?
5. Какова сущность ударного способа измельчения твердых материалов?
6. Каково устройство молотковой дробилки?
7. От каких параметров зависит производительность молотковой дробилки и степень измельчения продукта?
8. Какой процесс называется протирацией?
9. Как классифицируется протирающее оборудование?
10. Какие требования предъявляются к протирающим машинам?
11. Что понимается под процессом гомогенизации?

12. От каких факторов зависит степень гомогенизации?
12. Каково устройство и принцип действия клапанного гомогенизатора?
13. Каковы задачи сортирования материалов?
14. В чем заключается основное условие просеивания частиц?
15. Какими показателями оценивается качество смешивания сыпучих компонентов?
16. Что происходит при конвективном и диффузионном смешивании частиц?
17. Что понимается под связностью частиц при смешивании, и какие виды связности существуют?
18. Какие явления происходят при транспортировании частиц по продуктопроводам?
19. Какие параметры характеризуют движение сыпучих частиц в бункерах?
20. В чем сущность перемешивания пластичных и вязкоупругих пищевых сред, и на каком оборудовании осуществляется процесс перемешивания?
21. Какие явления происходят при раскатывании теста?
22. Какими показателями характеризуются физико-механические свойства пищевых материалов?
23. Какими основными реологическими свойствами обладают пищевые материалы, проявляемыми при их механической обработке?

Лекция 3. Гидромеханические процессы. Основные понятия и закономерности

Вопросы:

- 3.1. Основные понятия гидростатики и гидродинамики.
- 3.2. Понятие о вязкости и течении жидкостей.
- 3.3. Основные факторы гидродинамики аппаратов.
- 3.4. Анализ некоторых моделей истечения жидких продуктов

Условные обозначения.

Глоссарий.

Контрольные вопросы.

3.1. Основные понятия гидростатики и гидродинамики

Рассмотрение гидромеханических процессов начнем с основных понятий и закономерностей гидростатики и гидродинамики.

Основное свойство, которое отличает жидкость от твердого тела, заключается в том, что жидкость не способна сдерживать ни на одно мгновение напряжения сдвига. Если к жидкости приложить напряжение сдвига, то она начнет течь. Одни жидкости текут медленно, например, мед, другие, как вода и некоторые масла, быстро. Мерой легкости, с которой жидкость течет, является ее вязкость.

Гидростатика – это теория неподвижных жидкостей. Если жидкость находится в покое, то на нее не действуют никакие сдвиговые силы. Поэтому закон гидростатики заключается в том, что напряжения внутри жидкости всегда нормальны к любой ее поверхности.

Нормальная сила на единицу площади называется давлением. Ясно, что если в неподвижной жидкости нет сдвигов, то напряжение давления во всех направлениях одинаково (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Давление в неподвижной жидкости

Если ρ плотность жидкости считать постоянной и обозначить давление на некотором нулевом уровне через p_0 , то давление на высоте h , будет равно $p = p_0 + \rho gh$. Соотношение $p + \rho gh = const$ для неподвижной жидкости.

Условно выделим в жидкости маленький кубик со сторонами $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ и определим действующую на него силу

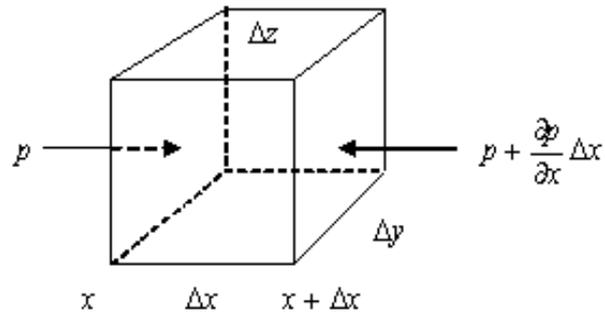


Рис. 3.2. Сила давления, действующая на элементарный кубик

Так как давление в любом месте во всех направлениях одинаково, то полная сила, действующая на единичный объем, может быть обусловлена только изменением давления. Пусть давление меняется в направлении оси x . Давление на грань с координатой x дает силу $p\Delta y\Delta z$, а давление на грань с координатой $x + \Delta x$ дает силу $-[p + (\partial p / \partial x)\Delta x]\Delta y\Delta z$. Результирующая сила равна $-(\partial p / \partial x)\Delta x\Delta y\Delta z$.

Если учесть остальные грани, то сила давления на единичный объем равна $-\nabla p$. При наличии других сил, например, сил тяжести, давление при равновесии должно компенсироваться ими.

Дополнительные силы можно описать потенциальной энергией. Обозначим через φ потенциальную энергию единицы массы (для притяжения $\varphi = gz$). Сила, действующая на единичную массу, задается через потенциал φ выражением $-\nabla\varphi$, и если учесть плотность жидкости ρ , то на единицу объема будет действовать сила $-\rho\nabla\varphi$.

В состоянии равновесия эта сила вместе с силой давления должны быть равны нулю $-\nabla p - \rho\nabla\varphi = 0$ – это и есть уравнение гидростатики.

Если плотность изменяется в пространстве, то нет возможности уравновесить все силы, и жидкость не может находиться в состоянии статического равновесия – в ней возникнут конвекционные потоки. При постоянной плотности решение уравнения имеет вид $p + \rho\varphi = const$.

Чтобы описать движение жидкости необходимо задать в каждой точке

некоторые ее свойства. Так, если жидкость движется в разных местах с различными скоростями, то, чтобы определить характер потока в каждой точке и в любой момент времени, нужно задать три компоненты скорости. Причем скорость не является единственной характеристикой жидкости: от точки к точке может меняться плотность, температура, давление.

Уравнение состояния жидкости, связывающее давление и плотность:

$$\rho = const.$$

Уравнение непрерывности выражает сохранение массы жидкости. Если вещество вытекает из какой-то точки, то его количество в этой точке должно уменьшаться. Если скорость жидкости равна v , то масса, которая протекает за единичное время через единицу площади поверхности, равна нормальной к поверхности компоненте ρv . Дивергенция такой величины определяется скоростью уменьшения плотности:

$$\nabla \cdot (\rho v) = -\frac{\partial \rho}{\partial t}.$$

При несжимаемой жидкости плотность ее постоянна и уравнение непрерывности записывается как $(\nabla \cdot v) = 0$.

Следующее уравнение гидродинамики получается из уравнения Ньютона. Произведение массы элемента жидкости на ускорение должно быть равно силам, действующим на этот элемент:

$$\rho \times (\text{ускорение}) = f,$$

где f – сила, действующая на единичный объем.

Плотность сил можно записать в виде трех слагаемых: силы давления на единицу объема $-\nabla p$; консервативных сил, приводящей к плотности сил $-\rho(\nabla \varphi)$; внешней силы, приходящейся на единицу объема $f_{\text{ВЯЗК}}$.

Уравнение движения:

$$\rho \times (\text{ускорение}) = -(\nabla p) - \rho(\nabla \varphi) + f_{\text{ВЯЗК}}.$$

Рассмотрим изменение скорости капельки жидкости. За небольшой интервал времени эта капелька изменит свое положение и в направлении оси x

передвинется на расстояние $v_x \Delta t$, аналогичные перемещения произойдут и в направлении осей y и z .

Если $v(x, y, z, t)$ скорость капельки в момент t , то скорость той же частицы в момент $t + \Delta t$ будет $v(x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z, t + \Delta t)$, причем $\Delta x = v_x \Delta t$, $\Delta y = v_y \Delta t$ и $\Delta z = v_z \Delta t$.

Из определения частных производных получим:

$$v(x + v_x \Delta t, y + v_y \Delta t, z + v_z \Delta t, t + \Delta t) = v(x, y, z, t) + \frac{\partial v}{\partial x} v_x \Delta t + \frac{\partial v}{\partial y} v_y \Delta t + \frac{\partial v}{\partial z} v_z \Delta t + \frac{\partial v}{\partial t} \Delta t.$$

Считая ∇ вектором, можно записать $(v \cdot \nabla)v + \frac{\partial v}{\partial t}$ и уравнение движения жидкости (без учета силы вязкости) выразится как:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla)v = -\frac{\nabla p}{\rho} - \nabla \varphi.$$

Под стационарным потоком жидкости понимается поток, скорость которого в любом месте жидкости никогда не меняется. Картина скоростей в таком потоке всегда выглядит одинаково и v представляет статическое векторное поле. Для стационарного потока можно записать:

$$v \cdot \nabla \left(\frac{p}{\rho} + \varphi + \frac{1}{2} v^2 \right) = 0,$$

т.е. все перемещения в стационарном потоке направлены вдоль линий тока и величина в скобках $\frac{p}{\rho} + \varphi + \frac{1}{2} v^2 = const$ представляет собой уравнение Бернулли, означающее сохранение энергии и позволяющее сразу описать поток.

Пример. Из отверстия, расположенного около дна цилиндрического резервуара вытекает вода. Рассмотрим случай, когда скорость потока $v_{\text{ВЫХ}}$ в отверстии значительно больше скорости потока вблизи поверхности воды в резервуаре. Давление на поверхность воды равно атмосферному давлению p_0 . Такое же давление будет и на бока вытекающей струи. В верхней части резервуара скорость воды примем равной нулю $v=0$. Гравитационный потенциал на поверхности будет также равным нулю, $\varphi=0$, а в отверстии

$$\varphi = -gh.$$

Напишем уравнение Бернулли: $p = p_0 + \frac{1}{2} \rho v_{\text{ВЫХ}}^2 - \rho gh.$

$$\text{Откуда } v_{\text{ВЫХ}} = \sqrt{2gh}.$$

3.2. Понятие о вязкости и течении жидкостей.

Рассмотрим реальное поведение жидкости. Из предыдущего материала следует, что законы движения жидкости содержатся в уравнении:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla)v = -\frac{\nabla \cdot p}{\rho} - \nabla \varphi + \frac{f_{\text{ВЯЗК}}}{\rho}.$$

В реальных жидкостях нельзя пренебрегать внутренним трением, называемым вязкостью, как это делается при рассмотрении течения идеальной жидкости.

Если приложить к жидкости напряжения сдвига, то, как бы они ни были малы, жидкость «поддается» и течет. В статике, очевидно, никаких напряжений сдвига нет. Вязкость описывает силы сдвига при движении жидкости.

Пусть между двух пластинок находится жидкость и необходимо определить силу сдвига при перемещении верхней пластинки (рис. 3.3), которая движется параллельно с постоянной скоростью v_0 относительно неподвижной нижней пластинки.

Сила, которая требуется для поддержания движения верхней пластинки, будет пропорциональна площади пластинки и отношению v_0/d .

Если выделить внутри потока небольшой объем в виде параллелепипеда, то силы в этом объеме определяются как:

$$\Delta F / \Delta S = \mu \frac{\partial v_x}{\partial y},$$

где μ – коэффициент пропорциональности (динамическая вязкость);

ΔS – площадь верхней грани параллелепипеда;

$\frac{\partial v_x}{\partial y}$ – скорость изменения деформации сдвига.

Тогда можно записать, что:

$$p_{xy} = \eta \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right).$$

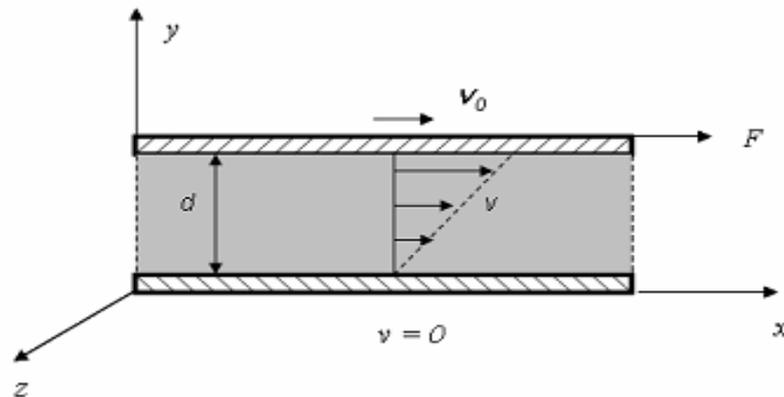


Рис.3.3. Модель движения жидкости между двумя пластинками

Аналогично соответствующие выражения запишутся для p_{yz} и p_{zx} .

По характеру поведения различают идеальные, реальные и реологические жидкости. Реологические жидкости характеризуются наличием пластических течений, ползучестью.

В реальных жидкостях при движении возникают силы внутреннего трения, оказывающие сопротивление течению жидкости. Вязкость – это основное отличие реальной жидкости от идеальной. Эталоном для определения вязкости принята дистиллированная вода, с ней сравнивают вязкость других жидкостей. Вязкость, измеряемая в градусах Энглера, определяется отношением времени t_1 истечения 200 см^3 исследуемой жидкости из специального сосуда ко времени истечения t такого же объема дистиллированной воды при температуре 20°C , $E^0 = t_1 / t$.

Идеальная жидкость. Если в сплошной среде, которая является мало сжимаемой и находится в покое, выделить некоторый объем и подвергнуть его всестороннему сжатию p , то от давления выделенный объем может изменить только свои размеры, не изменяя первоначальной формы, что будет свидетельствовать об отсутствии касательных напряжений. Величине внешнего давления p внутри выделенного объема будут противостоять только

нормальные напряжения, которые нормальны к любой поверхности объема, т.е. давление будет передаваться на все точки объема, и напряжение во всех направлениях будет одинаковым. Данный случай напряженного состояния, поскольку сплошная среда находится в покое, называется *гидростатическим давлением*.

Тензор напряжений в этом случае будет содержать только нормальные компоненты, которые равны между собой: $p_{11} = p_{22} = p_{33} = \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = -p$ или $\sigma_{ij} = -p\delta_{ij}$, причем $\sigma_{ij} = 0$, если $i \neq j$.

Если гидростатическое давление не будет менять объема сплошной среды (среда несжимаема) и в ней будет отсутствовать трение, то такая среда будет называться *идеальной (паскалевской) жидкостью*.

Идеальные жидкости – это несжимаемые жидкости, у которых отсутствует трение.

Уравнение непрерывности $\operatorname{div} v = 0$, где v – скорость течения. Стационарное течение идеальной жидкости $\frac{\partial v}{\partial t} = 0$.

Закон сохранения импульса, равный произведению массы на скорость, применим также для вязких жидкостей и турбулентных течений. В объеме жидкости, ограниченной некоторой воображаемой поверхностью, входящий или выходящий через эту поверхность импульс находится в равновесии с внешними силами (давления, напряжения при сдвиге и др.), действующими на поверхность.

Реальные жидкие и полужидкие пищевые продукты являются продуктами с различным реологическим поведением от ньютоновых до зависимых от времени и вязкоупругих.

Ньютоновы жидкости. Если сопротивление движению будет пропорционально относительной скорости перемещения частиц, то жидкости, подчиняющиеся этому закону, называют жидкостями Ньютона-Стокса или *ньютоновыми жидкостями*. Свойства таких сред описываются линейным уравнением:

$$\tau = \eta \dot{\gamma},$$

где τ – касательное напряжение (напряжение сдвига) между двумя соседними слоями,

$\dot{\gamma}$ – скорость сдвига;

$\dot{\gamma} = \partial v_0 / \partial x$, $\partial v_0 / \partial x$ – градиент скорости.

Напряжение направлено перпендикулярно направлению потока.

При взаимном движении слоев жидкости (деформация сдвига) вязкость η определяет связь между возникающими напряжениями и скоростью деформации.

Вязкость ньютоновых пищевых сред измеряется в Па·с или г/см·с, текучесть – в см·с/г. *Кинематическая вязкость* равна отношению динамической вязкости к плотности данной жидкости $\mu = \eta / \rho$, [мм²/с].

Для трехмерного пространства реологическое уравнение состояния ньютоновой жидкости записывается в виде:

$$p_{ij} = 2\mu \cdot d_{ij},$$

где p_{ij} – компоненты тензора напряжений;

d_{ij} – компоненты тензора скоростей деформации.

Вязкость жидкостей существенно уменьшается с увеличением температуры. Общей формулы, связывающей вязкость с изменением температуры, не существует. Среди эмпирических формул часто используют формулу Андраде:

$$\mu = A \exp(b/T),$$

где A, b – постоянные коэффициенты, определяемые опытным путем при изучении конкретных материалов.

С увеличением давления вязкость жидкостей увеличивается. Изменение вязкости может происходить линейно $\mu_1 = \mu_2 [1 + \alpha(p_1 - p_2)]$ или по экспоненте, например, для некоторых растительных масел, $\mu_1 = \mu_2 \exp[\alpha_1(p_1 - p_2)]$.

Реологическое поведение различных пищевых материалов, отвечающих требованиям ньютоновой жидкости, полностью описывается их вязкостью. К

таким продуктам относятся, например, молоко, пиво, вино, чай, кофе, фруктовые нектары, растительные масла, растопленные животные жиры. Однако многие жидкости представляют собой эмульсии или суспензии, в них содержатся водные растворы солей и сахаров, поэтому оценку вязкости таких жидкостей нужно проводить относительно вязкости воды при различных температурах и концентрации.

Например, при оценке вязкости яблочного и других соков и нектаров измерения проводятся на капиллярном вискозиметре в диапазоне температур от 10 до 80⁰С и при различной концентрации сока.

Теория вязкой жидкости, основанная на модели Ньютона, базируется на связи напряжения сдвига между слоями жидкости и скоростями деформации сдвига. Модель вязкой жидкости показывает, что поведение реальных тел может быть различным. Так, пищевые продукты, в зависимости от условий деформации проявляют различные свойства: они могут вести себя как упругие, пластичные тела или истинно вязкие жидкости. Неоднозначное поведение реальных тел необходимо учитывать в комплексе с другими параметрами технологического оборудования при его проектировании.

Если при воздействии неизменной внешней нагрузки, приложенной к телу, смещение частиц тела начинает увеличиваться во времени, то это смещение относят к *течению*. Течение при очень малых скоростях, когда для перемещения частей тела на 1мм требуется длительное время, называют *ползучестью*.

Неньютоновы жидкости. Если напряжения сдвига не пропорциональны скорости сдвига, то такие жидкости относятся к *неньютоновым (структурно вязким или аномально текущим)*. К ним относятся, например, многие лиофильные коллоиды, свойства которых при течении не удается охарактеризовать только одной вязкостью, зависящей не только от температуры и давления, но и от градиента скоростей, продолжительности течения и других факторов.

Эффективная вязкость является функцией от скорости сдвига и

времени $\eta(\dot{\gamma}, t)$.

Различают *неньютоновскую чисто вязкую жидкость*, в которой вся работа внешних сил диссипирует полностью в виде тепла вследствие вязкого трения, и *неньютоновскую вязкоупругую жидкость*, в которой часть работы идет на упругую обратимую деформацию. Напряжения в общем случае зависят от скорости деформации и от времени, т.е. от величины деформации. Если деформация продолжается достаточно длительное время и при этом устанавливается стационарный режим течения, тогда соотношение между сдвиговыми напряжениями и скоростью деформации представляет *кривую течения*. Если режим течения не устанавливается, то состояние материала будет непрерывно изменяться во времени.

Неньютоновское поведение жидкостей может проявляться в широком диапазоне скоростей сдвига и напряжений. Для таких сред характерна высокая вязкость в начальный период деформации при небольших напряжениях сдвига, затем последующее значительное падение вязкости, когда напряжение достигнет некоторой предельной величины, называемой *пределом текучести* τ_T , и маловязкое течение при напряжениях, превышающих данный предел. Твердая дисперсная среда такой структуры начинает разрушаться и течь, когда напряжения превысят предел прочности. Такое реологическое поведение тел называется *пластичностью* и является характерным для коагуляционных пищевых продуктов с достаточно твердой структурой.

При переходе от низких ($\tau < \tau_T$) к высоким напряжениям ($\tau > \tau_T$) поведение продукта будет все больше напоминать поведение жидкообразных продуктов. Величина предела текучести зависит от концентрации дисперсной фазы в структуре продукта, а вязкость при переходе через предел текучести определяется вязкостью дисперсной среды.

Пластичные вещества, такие как жиры, масла, пасты и др. обладают сопротивлением текучести, и для них существует *предел текучести*. Для таких веществ применим закон Бингхэма:

$$\tau - \tau_0 = \eta \frac{\partial v}{\partial r},$$

где τ_0 – напряжение сдвига при пределе текучести.

На рис. 3.4. приведены зависимости неньютоновых пищевых продуктов, у которых свойства не зависят от продолжительности сдвига. К таким продуктам относятся:

– вязкие пищевые продукты (кривая течения 4). У этих продуктов зависимость напряжения сдвига от скорости деформации линейный характер и отсекает на оси ординат отрезок равный τ_T , называемый *пределом текучести*:

$$\tau = \tau_T + \eta_p \dot{\gamma},$$

где $\eta_p = \eta - \frac{\tau_T}{\dot{\gamma}}$ – пластическая вязкость.

Продукты, с таким поведением относят к *идеально-пластичным материалам* или телам Шведова - Бингама. Если напряжение сдвига будет меньше предела текучести, то такие тела остаются неподвижными или могут перемещаться как твердое тело.

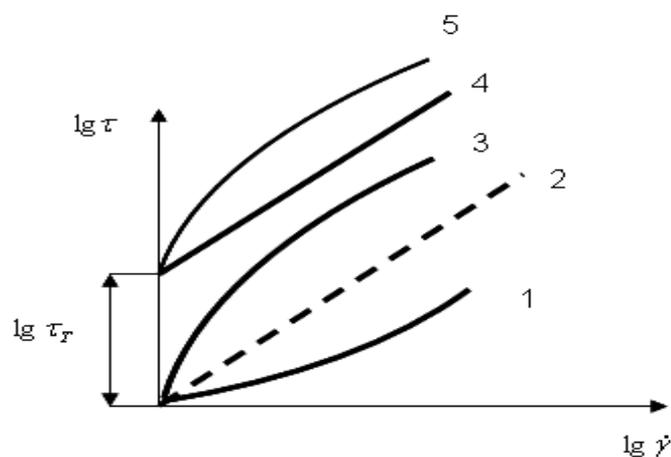


Рис. 3.4. Зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига:

1 – упрочняющиеся псевдопластичные продукты; 2 – ньютонова жидкость; 3 – псевдопластичные пищевые продукты; 4 – вязкие пищевые продукты;

5 – смешанный тип продуктов

кривая течения 5 соответствует *нелинейным вязкопластичным телам*.

Зависимость напряжения сдвига τ от скорости деформации $\dot{\gamma}$ у таких тел выражается как $\tau = \tau_T + \mu_p \dot{\gamma}^m$ (уравнение Шульмана) или $\tau = \tau_T + k\dot{\gamma}^n$, где k, n – коэффициент и показатель степени определяются экспериментально (уравнение

Хершеля-Балкли);

– *псевдопластичные пищевые продукты* (кривая 3). Поведение таких продуктов при напряжениях выше предела текучести называется пластичностью смешанного типа. Примерами псевдопластичных неньютоновских жидкостей сгущенное молоко, различного вида пюре, кетчуп и пр.;

– реологическое поведение *упрочняющихся пищевых продуктов* (кривая 1) обратно псевдопластичным продуктам.

Ниже (табл. 3.1) в качестве примера приведены числовые значения вязкости $\eta(\dot{\gamma})$, показателя n и предела текучести τ_T для некоторых пищевых продуктов, описываемых неньютоновой моделью реологического поведения.

Таблица 3.1.
Реологические параметры некоторых неньютоновых жидкостей

Наименование продукта	Эффективная вязкость $\eta(\dot{\gamma})$, мПа·с	Показатель степени для течения жидкости, n	Коэффициент консистенции, k	Предел текучести, τ_T , Па
Яблочное пюре		0,15...0,24	40,6...76,9	18,4...50,7
Сок томатный		0,40	187	
Томатная паста		0,28	139...252	78...212
Молоко сгущенное		0,834	36	
Йогурт	43	0,46	1,31	3,97
Сливочное масло		0,042	417,0	1,16
Мясо (30% жира)	254	0,341	160,2	27,8

Таким образом, к жидкостям относятся сложные реологические среды, при деформировании которых могут возникать следующие эффекты:

- неньютоновская вязкость при установившемся течении;
- упругость;
- структурные преобразования;
- существование пределов течения.

Материал относится к жидкости:

– если он обладает вязким течением и необратимые деформации в нем возникают при любых напряжениях по величине, т.е. жидкость не запасает работу внешних сил и вязкое сопротивление означает диссипацию этой работы. К вязким жидкостям относятся среды, в которых затраченная на их

деформирование энергия полностью диссипирует, переходя в тепло;

– если часть затраченной на деформирование материала работы сохраняется в виде упругих деформаций, то такой материал может быть отнесен в общем случае к вязкоупругим телам в т.ч. и к вязкоупругим жидкостям;

– пластичные материалы могут рассматриваться как жидкости в том случае, если в них необратимые деформации будут наблюдаться после перехода напряжений за предел текучести.

3.3. Основные факторы гидродинамики аппаратов

Работа многих аппаратов пищевых производств происходит при тесном контакте между жидкостью и подаваемым в аппарат газом или паром. Такой контакт, например, создается в насадочной колонне при стекании тонкого слоя жидкости под действием силы тяжести по поверхности насадок или путем образования завесы из капелек стекающей жидкости и ее взаимодействии с подаваемым навстречу паром. В барботерах контакт создается пропусканьем (барботированием) пара или газа через жидкость.

Исследования особенностей контакта газа и жидкости имеют большое значение при создании эффективных конструкций аппаратов и основываются на закономерностях гидродинамики происходящих при этом процессов.

Под *гидродинамикой аппарата* понимают совокупность факторов, связанных с движением и условиями перемешивания газовой и твердой или жидкой фаз.

Гидродинамическая обстановка в аппарате оказывает существенное влияние на происходящий процесс, например, процесс сушки, определяя его продолжительность и энергетические затраты.

Гидродинамическая обстановка определяется полем скоростей газовой и твердой (или жидкой при сушке капель) фаз.

Факторами, определяющими гидродинамику, являются:

- конструкция аппарата;
- свойства материала, такие как размер и форма частиц, плотность, адгезионно-когезионные показатели и др.

Основными признаками активных гидродинамических режимов являются развитая поверхность взаимодействия фаз, увеличение относительной скорости движения фаз, уменьшение энергоемкости процесса и металлоемкости аппаратов.

При течении тонких пленок по вертикальной или наклонной плоскости возможны два случая:

- стекание пленки при соприкосновении с неподвижным газом;
- стекание пленки навстречу потока газа.

В зависимости от скорости газового потока характер течения жидкостной пленки может изменяться. Характер этого течения определяется значением числа Рейнольдса и скоростью встречного потока газа. Ламинарное течение пленки наблюдается при $Re_{ж} < 20...30$. При больших числах наблюдается волновое течение жидкости и при $Re_{ж} > 1500$ - турбулентное течение. Если толщина стекаемой пленки будет составлять менее 50 мкм, то она из-за поверхностного натяжения распадется на отдельные струйки даже при неподвижном газовом потоке. С увеличением скорости встречного потока газа или пара более 7 м/сек наблюдается срыв пленки с поверхности насадки и унос ее в виде брызг.

Число Рейнольдса движущейся тонкой пленки равно:

$$Re_{ж} = \bar{\omega} d_{KB} / \nu ,$$

где $\bar{\omega}$ – средняя скорость течения жидкости;

$d_{ЭKB}$ – эквивалентный диаметр потока;

$$d_{ЭKB} = 4F / U , \quad F = l \cdot \bar{s} ; \quad U = l ,$$

где l – ширина пленки;

\bar{s} – средняя толщина пленки.

Средняя скорость течения:

$$\bar{\omega} = Q / \rho \bar{s},$$

где Q – массовое количество жидкости, стекающей за одну секунду на 1 м ширины пленки, кг/(м·с);

ρ – плотность жидкости.

Для создания лучшего контакта между газом (паром) и жидкостью в аппаратах (скрубберах) используются насадки. Насадки, изготавливаемые в виде небольших цилиндров, решеток, колец, звездочек сложной формы, устанавливаются на поддерживающую решетку, закрепленную внутри колонны. Пар или газ поступают под решетку снизу колонны и проходят через насадки. Жидкость при помощи разбрызгивателя подается сверху и стекает через слой насадок, соприкасаясь с поднимающимся газом. Для нормальной работы колонны жидкость должна равномерно распределяться по всему ее сечению. При противоточном движении пара и жидкости в насадочных колоннах возможны четыре режима движения:

- *пленочный режим*. Орошающая жидкость движется по орошаемой насадке в виде капель и пленок. Контакт между паром и жидкостью происходит по поверхности смоченной насадки. Пар движется с небольшой скоростью непрерывным сплошным потоком по всему объему насадки. При данном режиме дисперсной фазой является жидкость, а дисперсионной средой – газ (пар);

- *промежуточный режим*. Наблюдается при увеличении плотности орошения и скорости газа. Жидкость начинает стекать по насадке в виде струй, затормаживая движение пара, что создает вихри. Взаимодействие фаз происходит на поверхности струй;

- *турбулентный режим*. Характеризуется сохранением пленочно-струйного характера стекания жидкости, но в жидкой фазе возникает турбулентность. Данный режим возникает при значительных скоростях газа и приводит к задержке жидкости в насадке;

- *эмульгационный режим*. Возникает при увеличенной плотности орошения и большой скорости газа. Этот режим наиболее эффективен с

позиции перемешивания фаз. Недостатком такого режима может быть эффект захлебывания, когда жидкость перестает перемещаться вниз и увлекается вверх потоком газа.

Наличие насадки в скруббере помимо выполнения ею положительной роли приводит к потере напора, изменению скорости газа и влияет на интенсивность орошения.

Потери напора обуславливаются потерями на трение и на местные сопротивления, которые возникают при прохождении газового потока между насадками. Величина потерь определяется выражением:

$$\Delta p = \frac{fh\rho\omega^2}{2d'_{ЭКВ}},$$

где f – коэффициент гидравлического сопротивления;

h – высота слоя;

ρ – плотность газа;

ω – скорость газа в свободном сечении насадки;

$d'_{ЭКВ}$ – эквивалентный диаметр каналов, образованных насадочными элементами.

Коэффициент гидравлического сопротивления является функцией числа Рейнольдса $f = \varphi\left(\frac{d'_{ЭКВ}\omega\rho}{\mu}\right)$. Для области ламинарного течения $f = \frac{220}{Re}$, для $Re = 50...7200$ $f = 11,6/Re^{0,25}$, при $Re > 7200$ $f = 1,26$. При орошении насадок стекающая жидкость оказывает дополнительное сопротивление прохождению потока газа не только за счет уменьшения живого сечения, но и за счет взаимодействия газового потока с жидкостью.

Процесс распыления жидкости. При производстве некоторых пищевых продуктов, например, растворимого кофе, сухого молока и др. требуется распылить жидкость на мельчайшие капли с тем, чтобы при высушивании капель получить сухие смеси с минимально возможным расходом энергии. Для диспергирования жидкости в промышленности используются:

– распылительные форсунки механического типа;

- пневматические форсунки;
- центробежные распылители.

В механической форсунке (рис. 3.5) подаваемая под давлением 0,3...20 МПа жидкость проходит через отверстие небольшого диаметра и на выходе из него распыляется на мельчайшие капли. Для увеличения эффекта распыления струе часто сообщается вращательное вихревое движение.

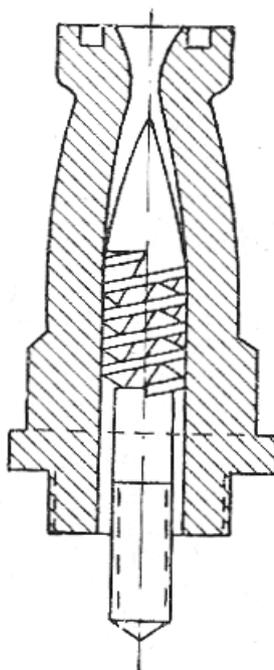


Рис. 3.5. Устройство механической форсунки

Механические форсунки обеспечивают ультратонкое диспергирование маловязких жидкостей с каплями на выходе от 30 до 150 нм. Эти форсунки не эффективны при распылении неньютоновых жидкостей и суспензий. Расход жидкости при распылении в механических форсунках может быть определен по следующей эмпирической формуле:

$$Q = kdp^n,$$

где $k = 30...50$ – коэффициент, учитывающий конструкцию форсунки;

d – диаметр выходного отверстия форсунки;

p – давление подаваемой жидкости;

n – показатель степени.

Пневматические форсунки работают с применением сжатого воздуха или

пара. Расход воздуха в среднем составляет $0,3...0,6 \text{ м}^3$ на 1 кг распыляемой жидкости. Пневматический способ позволяет распылять вязкие жидкости и суспензии.

При использовании центробежных распылителей диспергируемая жидкость подается на быстровращающийся диск. Конструктивные исполнения дисков зависят от вида распыляемой жидкости, например, для грубых суспензий используются сплошные диски, для тонких суспензий и гомогенных жидкостей – диски с канавками или лопатками наподобие лопаток турбин. Механизм образования капель зависит от интенсивности потока жидкости, частоты вращения диска, его конструктивных параметров. Минимальная окружная скорость диска, при котором наблюдается стабильное однородное распыление, составляет 60 м/сек. Частота вращения от 4000 до 20000 об/мин. С помощью распылительных дисков могут быть диспергированы не только ньютоновы и неньютоновы жидкости, но пастообразные вязкие массы.

Барботаж – это процесс прохождения газа или пара через жидкость. Различают два основных режима барботирования: пузырьковый и струйный. Пузырьковый режим осуществляется при малом расходе газа. При увеличении скорости газа возникает струйный режим, при котором газовый поток на выходе из барботера образует факел. При интенсивном струйном режиме при барботировании появляются пена и брызги.

На рис. 3.6. приведены схемы барботажных аппаратов различных типов.

Потери напора в барботерах вызываются сопротивлением сухого барботера и сопротивлений, обусловленных силами поверхностного натяжения и оказываемых столбом газо-жидкостной эмульсии.

При пропускании воздуха через материал, состоящий из сыпучих частиц, может наблюдаться процесс аналогичный процессу барботирования. При определенной скорости воздуха, проходящего через слой сыпучих частиц, в нем возникает своеобразное состояние, называемое «кипящим слоем». При небольших скоростях воздух просто фильтруется находящимся в покое слоем. С увеличением скорости давление воздуха становится равным весу слоя. Слой

начинает изменять свой объем и при достижении определенной величины скорости (первая критическая скорость) происходит его псевдооживление. Частицы становятся подвижными, и слой начинает напоминать маловязкую жидкость и как бы закипает. При дальнейшем увеличении скорости воздуха наступает бурление и выброс частиц в газовую среду. При второй критической скорости весь слой переходит во взвешенное состояние.

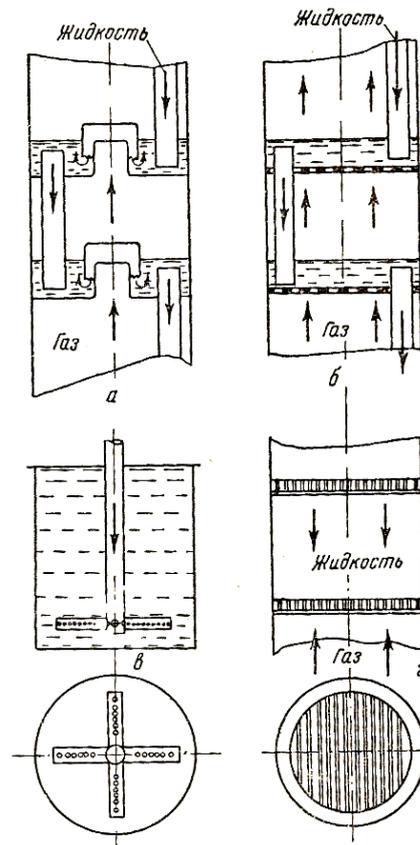


Рис. 3.6 Типы барботажных аппаратов:
а – капильковый; б – ситчатый; в – с трубчатым распылителем; г – решетчатый

В псевдооживленном слое происходит интенсивное перемешивание частиц, что позволяет интенсифицировать тепловые и диффузионные явления в этом слое. Метод псевдооживления широко используется при сушке сыпучих частиц.

Для оценки показателя активности гидродинамической обстановки в аппаратах составляется балансовое уравнение:

$$\alpha S_{\text{ч}}(t - \theta)\eta = -\frac{dU}{d\tau} m_{\text{ч}}(r_{\text{ч}} + \Delta r), \quad (1)$$

где S_q, m_q – поверхность и масса частицы материала соответственно;

U, θ – влагосодержание и температура частицы материала соответственно;

t – температура среды;

η – доля подведенного к частице тепла, пошедшего на испарение влаги;

r_u – удельная теплота парообразования;

Δr – удельная теплота энергии связи;

τ – время процесса.

Из уравнения (1) следует:

$$\frac{S_{q, y\partial}}{r_n + \Delta r} \int_0^{\tau_n} \alpha d\tau = - \int_{U_n}^{U_k} \frac{dU}{(t - \theta)\eta},$$

где τ_n – время процесса;

$S_{q, y\partial}$ – удельная поверхность частицы.

Равенство средних величин, вынесенных из-под интегралов

$\frac{S_{q, y\partial}}{r_n + \Delta r} \bar{\alpha} \tau_m (\bar{t} - \bar{\theta}) \eta = (U_n - U_k)$, показывает, что для сушки одного и того же материала от начального влагосодержания U_n до конечного U_k при одинаковой производительности по сухому продукту увеличение τ_n ведет к уменьшению $\bar{\alpha}$.

Оптимальный средний коэффициент теплоотдачи $\bar{\alpha}$, соответствующий активному гидродинамическому режиму, оценивается их равенства:

$$\bar{\alpha} \tau_n \Delta \bar{t} \eta = const,$$

где $\Delta \bar{t}$ – разность температур среды и материала.

Данное выражение используется для выбора сушильного аппарата для конкретного материала. Зная принадлежность материала к определенной группе классификации можно оценить время его сушки τ_n , а при выбранном аппарате – величину $\Delta \bar{t} \eta$. Если произведение $\bar{\alpha} \tau_n \cdot \Delta \bar{t} \eta$ будет больше определенного предела, то средний коэффициент теплоотдачи выбран завышенным, т.е. для данного аппарата такой высокий уровень скоростей

экономически нецелесообразен.

3.4. Анализ некоторых моделей истечения жидких продуктов

В разных отраслях пищевой промышленности широко используются трубопроводы и технологические резервуары различного назначения и формы, служащие для транспортирования, хранения или тепловой обработки жидких продуктов.

Содержимое резервуаров может удаляться истечением через патрубок трубопровода или путем наклона самого резервуара. Задача исследования истечения жидкости заключается в определении времени освобождения резервуара.

Модель истечения основывается на положениях теории свободных струй Гельмгольца-Кирхгофа.

1-я модель.

Пусть имеется емкость, заполненная жидкостью плотности ρ при давлении p_1 . Вне емкости находится жидкость меньшей плотности, давление в которой равно p_0 , ($p_0 < p_1$). При открывании патрубка жидкость будет вытекать в область более низкого давления в виде струи (рис.3.7).

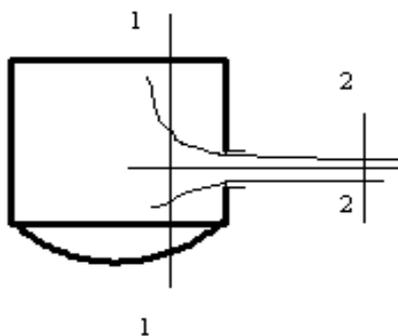


Рис. 3.7. Схема истечения жидкости из резервуара (случай 1)

При установившемся режиме скорость струи может быть вычислена следующим образом.

Из уравнения Бернулли при стационарном течении вдоль линии тока ab

следует, что величина $p + \frac{\rho u_a^2}{2}$ является постоянной. Так что:

$$p_a + \frac{\rho u_a^2}{2} = p_b + \frac{\rho u_b^2}{2}.$$

Так как $u_b \gg u_a$, можно записать $p_a \approx p_b + \frac{\rho u_b^2}{2}$.

Поскольку $p_b = p_a, p_a = p_1$, то $u_b^2 = \frac{2(p_1 - p_a)}{\rho}$.

Объем жидкости, вытекающий за единицу времени $V = u_b S_b$, где S_b – поперечное сечение струи по сечению 2-2. Площадь отверстия $S_0 \neq S_b$ из-за эффекта сужения струи. Коэффициент сужения $K_c = S_b / S_0$ зависит от угла, образованного стенками емкости с осью симметрии струи – при $\alpha = 0$ $K_c = 1$; $\alpha = 90^\circ$ $K_c = 0,61$; $\alpha = 180^\circ$ $K_c = 0,5$.

2-я модель.

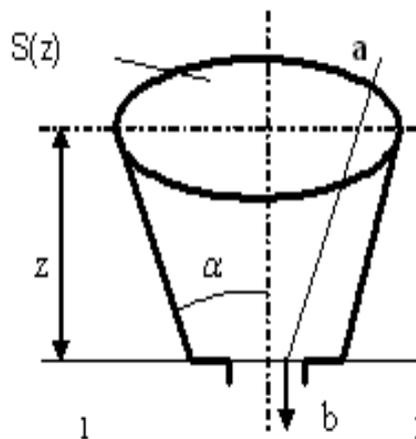


Рис.3.8. Истечение жидкости из резервуара (случай 2)

Для случая, когда емкость открыта с обоих концов (рис.3.8), с учетом силы тяжести и стационарности течения величина $p = \frac{\rho u^2}{2} + \rho g z$ будет постоянной вдоль каждой линии тока. Тогда для линии ab можно записать $p_b + \frac{\rho u_b^2}{2} = p_a + \frac{\rho u_a^2}{2} + \rho g h$, где h – высота от сечения 1-1 до свободной поверхности жидкости. Давления в точках a и b должны быть равны внешнему

давлению. Так как величина u_a^2 мала по сравнению с u_b^2 , то можно записать $\rho u_b^2 / 2 = \rho gh$, откуда $u_b = \sqrt{2gh}$.

3-я модель. Истечение жидкости из емкости при ее наклоне.

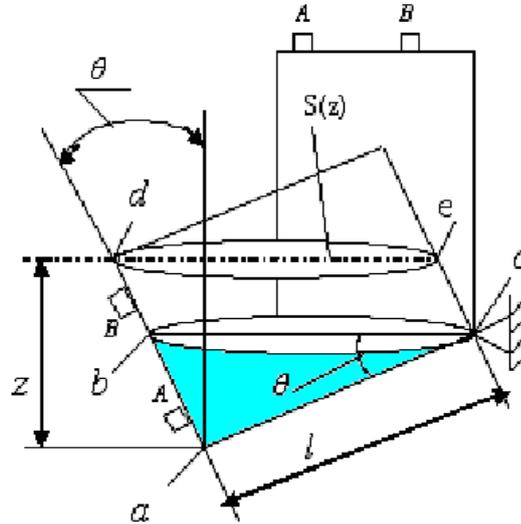


Рис.3.9. Модели истечения жидкости из емкости при ее наклоне

Пусть поперечное сечение жидкости в емкости (рис.3.9) S_1 соответствует высоте h_1 . Величина h определяется из условия, что начальный объем жидкости V_0 соответствует определенной единице объема, например одному литру.

Рассмотрим модель, в которой угол наклона θ является постоянным $\theta = \alpha$.

Объем жидкости в начальный момент после наклона емкости состоит из двух частей: наклонного конуса abc высотой $h = l \cdot \sin \alpha$ и наклонного цилиндра $bdec$ высотой $(h - h_1)$ с эллиптическим поперечным сечением площадью S_1 .

Таким образом, $S(z) = S_1(z/h_1)^2, 0 \leq z \leq h_1$; $S(z) = S_1, h_1 \leq z \leq h$.

Время на вытекание всей жидкости равно $t = \frac{2S_1 h \left\{ 1 - \frac{4}{5} \sqrt{\frac{h_1}{h}} \right\}}{S_o K_c \sqrt{2gh}}$.

Условные обозначения

p – давление.

ρ – плотность жидкости.

φ – потенциальная энергия единицы массы.

f – сила, действующая на единицу объема.

∇ – оператор Гамильтона.

v – скорость течения жидкости.

μ – кинематическая вязкость.

p_{ij} – тензор напряжений.

$\dot{\gamma}$ – скорость сдвига.

τ – касательное напряжение.

σ – нормальное напряжение.

$\frac{\partial v}{\partial x}$ – градиент скорости.

τ_T – предел текучести.

r_n – удельная теплота парообразования.

θ – температура частицы материала.

Глоссарий

Идеальная жидкость – несжимаемая жидкость, у которой отсутствует трение.

Ньютонова жидкость – жидкость, у которой сопротивление движению пропорционально относительной скорости перемещения частиц.

Неньютонова жидкость – жидкость, у которой напряжение сдвига непропорционально скорости сдвига.

Кинематическая вязкость – отношение динамической вязкости к плотности жидкости.

Пластичность – реологическое поведение тела, когда дисперсионная среда структуры тела после превышения напряжениями предела прочности начинает течь.

Гидродинамика аппарата – совокупность факторов, связанных с

движением и условиями перемешивания фаз.

Контрольные вопросы

1. Что такое гидростатика, и какие задачи она решает?
2. В чем сущность уравнения гидростатики?
3. В чем заключается смысл гидростатического давления?
4. Какие параметры связывает уравнение состояния жидкости?
5. Что выражает уравнение непрерывности, и как оно записывается?
6. Какие величины входят в уравнение движения жидкости?
7. Что понимается под стационарным потоком?
8. Каков физический смысл уравнения Бернулли?
9. В чем состоит отличие идеальных и реальных жидкостей?
10. Что понимается под вязкостью?
11. От каких факторов зависит вязкость жидких сред?
12. Что понимается под ньютоновой жидкостью?
13. Как изменяется поведение реальных тел в зависимости от изменения их вязкости?
14. Что понимается под неньютоновой жидкостью?
15. Какое явление называется ползучестью?
16. Для каких материалов характерна пластичность?
17. Какими эффектами характеризуются жидкости как сложные реологические среды?
18. По каким признакам материалы относят к жидкостям?
19. Что понимается под гидродинамикой аппаратов?
20. На что оказывает влияние гидродинамическая обстановка в аппарате, и от каких факторов она зависит

Лекция 4. Тепловые процессы. Основные виды теплопередачи. Теплообменные аппараты

Вопросы:

- 4.1. Основные понятия о процессах теплообмена.
- 4.2. Передача теплоты теплопроводностью.

4.3. Основные сведения о конвективном теплообмене.

4.4. Передача теплоты излучением.

4.5. Аппараты для нагревания и охлаждения продуктов.

4.6. Процессы нагревания, охлаждения и конденсации. Конденсаторы.

Условные обозначения.

Глоссарий.

Контрольные вопросы.

4.1. Основные понятия о процессах теплообмена

К основным целям и задачам процессов тепловой обработки в пищевых производствах относятся:

- поддержание стабильной температуры на заданном уровне;
- нагревание или охлаждение продуктов;
- ускорение растворения веществ;
- интенсификация сушки материалов и др.

Эти процессы происходят в различных теплообменных аппаратах и устройствах.

Процесс переноса тепловой энергии между телами с различной температурой называется *теплообменом*. Движущей силой теплообмена согласно второму закону термодинамики является разность температур между телами. С физических представлений теплообмен представляет собой обмен энергией между молекулами, атомами и свободными электронами.

Передача теплоты осуществляется с помощью теплоносителей, в качестве которых выступают дымовые газы, горячий воздух, водяной пар, вода и др. В пищевых производствах наиболее широко применяется нагревание насыщенным или слегка перегретым водяным паром. Нагревание продуктов паром происходит следующим образом:

- при барботировании пара через жидкость;
- впуском пара в рабочий объем реактора;
- при непосредственном контакте пара с продуктом;

– «глухим» паром, когда пар конденсируется на поверхности теплообменника и отдает этой поверхности теплоту парообразования, а конденсат отводится из теплообменника с помощью водоотводчика.

Преимущества водяного пара, как теплоносителя, заключаются в удобстве его транспортировки по трубам, в достаточно легком регулировании температуры при изменении давления, интенсивной теплоотдаче при конденсации пара и др. К недостаткам парового и водяного нагрева относится значительное увеличение давления при повышении температуры, что ведет к чрезмерному увеличению металлоемкости аппаратов.

Поток внутренней энергии, передаваемый теплоносителем нагреваемому продукту в результате их контакта или облучения, называется *тепловым потоком*. Этот поток возникает при разности между температурами взаимодействующих тел, т.е. при наличии *температурного напора*.

Существуют три способа переноса тепла:

- *теплопроводность*, характерная для твердых тел;
- *конвекция*, имеющая место в движущихся жидкостях и газах;
- *электромагнитное излучение* между двумя телами через промежуточную среду.

Теплообмен между продуктом и обтекающей его жидкой или газообразной средой называется *теплоотдачей*.

Теплообмен между двумя средами, разделенными поверхностью фазового контакта или твердой стенкой называется *теплопередачей*. Под теплопередачей подразумевают суммарный эффект переноса тепла различными способами при прохождении теплового потока.

Различают:

- общее количество переданного тепла Q_0 , Дж ;
- общий тепловой поток Q , Дж/сек;
- удельный тепловой поток $q = Q / F$, где F - поверхность внутри тела или на границе со средой, через которую по нормали проходит тепловой поток, Вт/м² или Дж/м²·сек.

По Ньютону:

$$q = \alpha \Delta t ,$$

где $\Delta t = t_1 - t_c$ – разность между температурами тела и среды;

α – коэффициент пропорциональности (коэффициент теплоотдачи).

В современной теплотехнике выражения для удельного теплового потока записываются следующим образом:

$$q = \alpha(t_{CT1} - \bar{t});$$

$$q = k(\bar{t}_1 - \bar{t}_2),$$

где \bar{t}_{CT}, \bar{t} – средняя температура поверхности стенки и средняя температура среды соответственно;

\bar{t}_1, \bar{t}_2 – средние температуры греющей и обогреваемой сред, разделенных стенкой соответственно;

λ – коэффициент теплопередачи.

Размерности коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи одинаковы – $Вт/м^2 \cdot град$ или $Дж/м^2 \cdot сек \cdot град$.

Коэффициенты теплоотдачи определяются из критериальных уравнений для каждого случая теплообмена. Коэффициент теплопередачи, отражающий суммарный эффект теплообмена, определяется как величина обратная сумме термических сопротивлений, преодолеваемых тепловым потоком при последовательном прохождении участков: *среда – стенка – среда*.

Процесс теплообмена относится к сложным физическим процессам, зависящим от большого числа факторов. На его эффективность влияют форма и шероховатость поверхности, средний температурный напор и многие другие факторы.

На рис. 4.1 приведены кривые распределения температур в материале при конвективном и кондуктивном способах подвода тепла. Здесь θ – текущая температура материала, l – толщина материала, $x=l$ – свободная поверхность, $x=0$ – греющая поверхность. Температура при кондуктивном подводе тепла непрерывно убывает от контактного слоя к открытой поверхности. В центре материала температура выше, чем на поверхности. При конвективном подводе

температура материала в центре ниже, чем на поверхности.

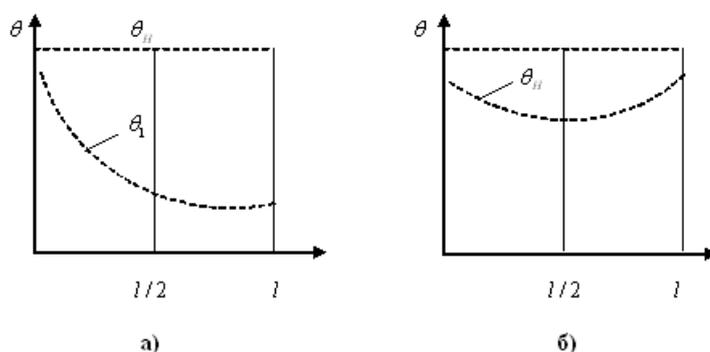


Рис. 4.1. Распределение температуры в материале при кондуктивном (а) и конвективном (б) подводе тепла

При конвекции подвод тепла к телу зависит от гидродинамической обстановки в аппарате и параметров теплоносителя, что накладывает определенные ограничения гидродинамического порядка, например, невозможность увеличения скорости теплоносителя выше определенного значения из-за уноса материала и т.п.

При кондуктивном способе скорость подвода тепла зависит от параметров нагревателя, его температуры, теплопроводности материала и других факторов.

Среди различных способов подвода тепла в процессах нагрева материалов (сушка, выпечка и др.) перспективным является радиационный (лучистый) нагрев, преимущество которого заключается в интенсификации процесса и меньших затратах энергии. При радиационном подводе температурные градиенты внутри тела достигают больших значений.

Процессы распространения теплоты в твердых, жидких и газообразных телах широко используются в технологическом оборудовании пищевых производств.

Процесс переноса теплоты теплопроводностью происходит при непосредственном соприкосновении тел с разной температурой. Теплопроводность согласно современным воззрениям представляет собой молекулярный процесс передачи теплоты, которая постепенно

распространяется по всему телу. Перенос теплоты теплопроводностью зависит от свойств тела, его размеров, разности температур между различными его частями. Сложность точного описания тепловых процессов при теплопроводности заключается в том, что эти процессы происходят в неоднородных анизотропных средах.

Перенос теплоты конвекцией происходит только в газах и жидкостях и осуществляется при перемещении или перемешивании неравномерно нагретых этих сред. Конвекционный перенос теплоты происходит тем интенсивней, чем больше скорость движения среды и вследствие непосредственного контакта частиц среды с разной температурой всегда сопровождается теплопроводностью.

Одновременный перенос теплоты конвекцией и теплопроводностью называется *конвективным теплообменом*. Он может быть вынужденным или свободным. При вынужденном теплообмене движение рабочего тела вызывается каким-либо рабочим элементом машины или аппарата (мешалкой, компрессором, насосом и т.п.). При свободном теплообмене движение рабочего тела возникает вследствие разности плотностей отдельных объемов среды от действия температуры.

Процесс передачи теплоты излучением между двумя разделенными средой телами осуществляется поэтапно: сначала происходит превращение части внутренней энергии тела в энергию излучения, затем распространение волн в пространстве и далее поглощение энергии излучения другим телом. Перенос энергии может быть осуществлен инфракрасными лучами, вихревыми токами, токами СВЧ и др.

Совокупность всех трех видов передачи теплоты называется *сложным теплообменом*.

4.2. Передача теплоты теплопроводностью

В общем случае процесс передачи теплоты теплопроводностью в твердом теле сопровождается изменением температуры тела t в пространстве и во

времени, т.е. $t = f(x, y, z, \tau)$. Данная функция определяет *температурное поле*.

Если температура будет являться функцией координат и времени, то температурное поле является *нестационарным*, т.е. зависящим от времени $\partial t / \partial \tau \neq 0$, если температура не изменяется с течением времени, то поле *стационарно* $t = f(x, y, z), \partial t / \partial \tau = 0$.

Если температура тела является функцией двух координат, то температурное поле для стационарного режима:

$$t = f(x, y), \partial t / \partial z = \partial t / \partial \tau = 0;$$

а для нестационарного:

$$t = f(x, y, \tau), \partial t / \partial z = 0; \partial t / \partial \tau \neq 0.$$

Для одномерного случая, например, при переносе теплоты через стенку аппарата, у которой длина и ширина являются бесконечно большими величинами по сравнению с толщиной, уравнение температурного поля для стационарного режима запишется как:

$$t = f(x), \partial t / \partial \tau = 0; \partial t / \partial y = \partial t / \partial z = 0,$$

а для нестационарного:

$$t = f(x), \partial t / \partial \tau \neq 0; \partial t / \partial y = \partial t / \partial z = 0.$$

Если в теле соединить точки с одинаковой температурой линиями (изотермами), то поверхность равных температур называется *изотермной поверхностью*. Изотермные поверхности не пересекаются друг с другом. При рассмотрении двух изотермных поверхностей можно заметить, что интенсивность изменения температуры по разным направлениям неодинакова. Наибольшее изменение (наибольшая разность на единицу длины) наблюдается в направлении нормали к изотермной поверхности.

Предел отношения изменения температуры Δt к расстоянию между изотермами по нормали Δn при $\Delta n \rightarrow 0$, называется *градиентом температуры* $\text{grad } t = \partial t / \partial n$, (град/м).

Градиент – это вектор, направленный по нормали к изотермной поверхности в сторону увеличения температуры, численно равный

производной от температуры по этому направлению.

При передаче теплоты теплопроводностью градиент температуры в разных точках тела не должен быть равен нулю. Связь между количеством теплоты dQ , проходящей через элементарную площадку dF на изотермной поверхности за промежуток времени $d\tau$, и градиентом температуры устанавливается зависимостью Фурье (основной закон теплопроводности):

$$dQ = -\lambda dF \operatorname{grad} t \, d\tau = -\lambda dF d\tau (\partial t / \partial n).$$

Здесь минус показывает, что в направлении теплового потока температура убывает и градиент отрицателен.

Величина λ является коэффициентом пропорциональности, называемым *коэффициентом теплопроводности*, Вт/(м·град). Числовое значение коэффициента определяет количество теплоты, проходящей через единицу изотермной поверхности в единицу времени, при условии, что градиент температуры равен единице. Коэффициент теплопроводности зависит от давления и температуры и определяется опытным путем, его значения приводятся в справочных таблицах.

Количество теплоты, проходящее через единицу изотермной поверхности в единицу времени, называется *плотностью теплового потока* или вектором плотности теплового потока, его размерность Вт/м²:

$$q = -dQ / (dF d\tau) = -\lambda (\partial t / \partial n).$$

Этот вектор направлен по нормали к изотермной поверхности в сторону убывания температуры.

Выше было дано определение теплового потока как потока внутренней энергии, передаваемой теплоносителем нагреваемому продукту в результате их контакта или облучения. Более строгое определение теплового потока – это количество теплоты, прошедшее в единицу времени через произвольную поверхность F , (Вт):

$$Q = \int_F q dF = - \int_F \lambda dF (\partial t / \partial n).$$

Для определения количества теплоты, проходящей через какую-то

произвольную поверхность тела, необходимо знать температурное поле внутри этого тела, что и составляет основную аналитическую задачу теории теплопроводности.

В нестационарном температурном поле без тепловых источников связь между величинами, участвующими в передаче теплоты теплопроводностью для точки x, y, z , устанавливается дифференциальным уравнением теплопроводности:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \text{ или } \frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t,$$

где $\nabla^2 = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right)$ – «набла» - оператор Лапласа;

$a = \frac{\lambda}{c\rho}$, (м²/сек) – коэффициент температуропроводности.

Уравнение $\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t$ для трехмерного нестационарного температурного поля при отсутствии внутренних источников теплоты является основным уравнением при изучении вопросов нагрева и охлаждения тел в процессе передачи теплоты теплопроводностью, устанавливающим связь между временным и пространственным изменением температуры в любой точке поля.

Дифференциальное уравнение теплопроводности с источниками теплоты внутри тела имеет вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + \frac{q_v}{c\rho},$$

где q_v – количество выделяемой теплоты в единице объема вещества в единицу времени, Вт/м³;

c – массовая теплоемкость тела, Дж/(кг·град);

ρ – плотность вещества, кг/м³.

Для применения уравнения в конкретном случае нужно знать форму и размеры тела, физические параметры среды и тела, начальные условия, т.е. распределение температур в теле в начальный момент времени, и граничные условия, которые характеризуют распределение температур на поверхности

тела или его взаимодействие со средой. В совокупности эти условия называются условиями однозначности или краевыми условиями. Обычно принимают в начальный момент времени $\tau = 0$.

Граничные условия могут быть заданы тремя способами:

- граничное условие первого рода задается распределением температуры на поверхности тела для любого момента времени;
- граничное условие второго рода задается плотностью теплового потока в каждой точке поверхности тела для любого момента времени;
- граничное условие третьего рода задается температурой среды, окружающей тело, и законом теплоотдачи между поверхностью и средой.

В соответствии с законом сохранения энергии количество теплоты, отданное единицей поверхности окружающей среде в единицу времени должно быть равно теплоте, подводимой путем теплопроводности к этой единице поверхности со стороны внутренних частей тела в единицу времени:

$$\alpha(t_2 - t_1) = -\lambda(\partial t / \partial n)_n,$$

где t_2, t_1 – температура поверхности тела и среды соответственно;

$(\partial t / \partial n)_n$ – проекция градиента температуры к площадке.

Рассмотрим некоторые типовые случаи теплопередачи.

Случай 1 – Плоская стенка (рис.4.2). Пусть рассматриваемая стенка имеет одинаковую толщину δ с одинаковыми температурами поверхностей t'_{CT} , t''_{CT} и постоянным коэффициентом теплопроводности λ . Температура изменяется в направлении перпендикулярном плоскости стенки и в любой точке тела является неизменной и не зависящей от времени $\partial t / \partial \tau = 0$.

Учитывая, что $\partial t / \partial y = \partial t / \partial z = 0$ и $\partial^2 t / \partial y^2 = \partial^2 t / \partial z^2 = 0$, уравнение теплопроводности имеет вид:

$$d^2 t / dx^2 = 0.$$

Его решение дает $t = C_1 x + C_2$, т.е. при постоянном коэффициенте теплопроводности закон изменения температуры при передаче теплоты через плоскую стенку является линейным.

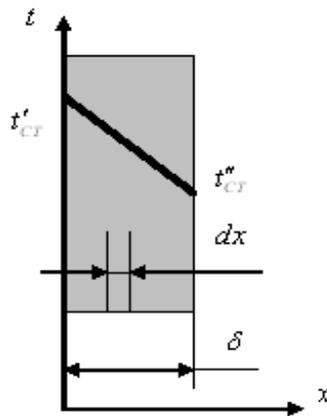


Рис.4.2. Схема теплопередачи через плоскую тонкую стенку

Постоянные интегрирования C_1 и C_2 : при $x = 0$ температура стенки равна $t = t'_{CT} = C_2$, а при $x = \delta$ температура будет $t = t''_{CT} = C_1\delta + t'_{CT}$. Откуда:

$$c_1 = (t''_{CT} - t'_{CT}) / \delta = dt / dx.$$

Плотность теплового потока:

$$q = -\lambda(dt/dn) = -\lambda(dt/dx) = -\lambda(t''_{CT} - t'_{CT}) / \delta$$

или

$$q = \frac{\lambda}{\delta}(t'_{CT} - t''_{CT}).$$

Общее количество теплоты, передаваемое теплопроводностью через плоскую стенку с поверхностью F за время τ равно:

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} F \Delta t \tau,$$

где $\Delta t = t'_{CT} - t''_{CT}$ – температурный напор.

В реальных условиях коэффициент теплопроводности зависит от температуры и закон ее изменения в стенке выражается кривой линией. При переменном коэффициенте теплопроводности (считая зависимость линейной $\lambda = \lambda_0(1 + bt)$) плотность теплового потока выражается формулой:

$$q = \frac{\lambda_0}{\delta} \left[1 + b \frac{t'_{CT} + t''_{CT}}{2} \right] (t'_{CT} - t''_{CT}).$$

Здесь множитель $\lambda_0 \left(1 + b \frac{t'_{CT} + t''_{CT}}{2} \right)$ – среднеинтегральная величина коэффициента теплопроводности.

Уравнение температурной кривой в стенке:

$$t_x = \sqrt{\left(\frac{1}{b} + t'_{CT}\right)^2 - \frac{2qx}{\lambda_0 b}} - \frac{1}{b}.$$

При отрицательном коэффициенте b кривая направлена выпуклостью вниз.

Случай 2 – Многослойная плоская стенка (рис.4.3). Формула теплопроводности многослойной стенки выводится из уравнения теплопроводности для отдельных слоев при допущении, что тепловой поток, проходящий через любую изотермную поверхность неоднородной стенки, одинаков.

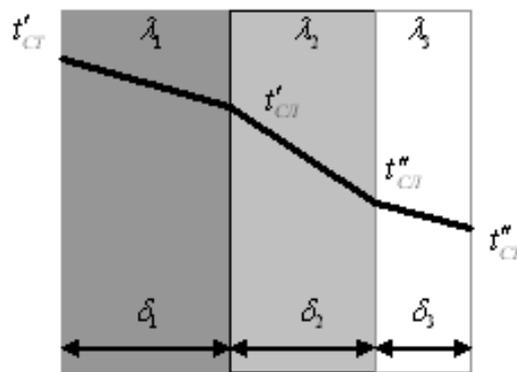


Рис.4.3. Схема теплопередачи через многослойную плоскую стенку

Тепловой поток для каждого слоя:

$$Q = \frac{\lambda_1}{\delta_1} F(t'_{CT} - t'_{cл}),$$

$$Q = \frac{\lambda_2}{\delta_2} F(t'_{cл} - t''_{cл}),$$

$$Q = \frac{\lambda_3}{\delta_3} F(t''_{cл} - t''_{CT}).$$

Выразив эти уравнения относительно разности температур, и сложив, найдем:

$$Q = [F(t'_{CT} - t''_{CT})] / \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i},$$

где $\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}$ – полное термическое сопротивление многослойной стенки.

Температуры между отдельными слоями стенки равны:

$$t'_{сл} = t'_{ст} - \frac{Q\delta_1}{F\lambda_1}, \quad t''_{сл} = t'_{сл} - \frac{Q\delta_2}{F\lambda_2} \text{ и т.д.}$$

Случай 3 – Однослойная цилиндрическая стенка (рис. 4.4). Пусть труба имеет бесконечную длину. В этом случае температурное поле можно принять одномерным $t = f(r)$, где r текущая цилиндрическая координата. Температуры на внешней $t'_{ст}$ и внутренней $t''_{ст}$ поверхностях трубы постоянны. Изотермные поверхности представляют собой концентрические поверхности с общей осью трубы. Температура меняется в направлении радиуса, и тепловой поток радиален.

Выделим внутри трубы элементарный кольцевой слой радиусом r и толщиной dr , тогда можно рассматривать этот слой как плоскую стенку, разность температур между поверхностями которого будет также бесконечно малой и равной dt .

Отсюда $Q = -\lambda Fl(dt/dr)$ или для кольцевого слоя $Q = -\lambda 2\pi rl(dt/dr)$. Разделив переменные, получим уравнение $dt = -(Q/2\pi l)(dr/r)$, интегрируя которое в пределах $t'_{ст} \div t''_{ст}$ и $r_1 \div r_2$, найдем решение $t'_{ст} - t''_{ст} = (Q/2\pi\lambda l)\ln r_2/r_1$, откуда $Q = \frac{l(t'_{ст} - t''_{ст})}{(1/2\pi\lambda)\ln d_2/d_1}$.

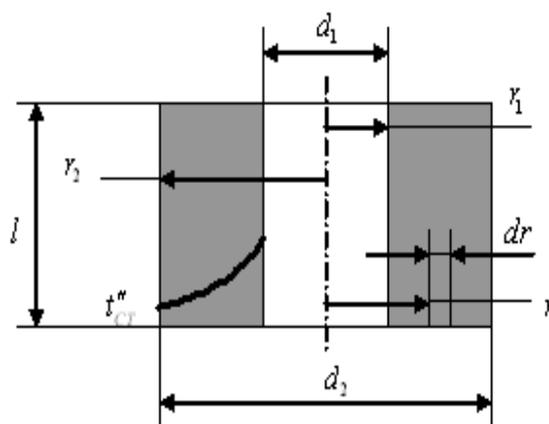


Рис. 4.4. Схема теплопередачи через цилиндрическую стенку трубы

Тепловой поток относительно единицы длины трубы

$$q_1 = \frac{Q}{l} = \frac{2\pi\lambda(t'_{CT} - t''_{CT})}{\ln d_2/d_1}, \quad \text{относительно внутренней} \quad q_1 = \frac{Q}{\pi d_1 l} = \frac{2\lambda(t'_{CT} - t''_{CT})}{d_1 \ln d_2/d_1} \quad \text{или}$$

$$\text{внешней} \quad q_2 = \frac{Q}{\pi d_2 l} = \frac{2\lambda(t'_{CT} - t''_{CT})}{d_2 \ln d_1/d_2} \quad \text{поверхности.}$$

Случай 4 – Многослойная цилиндрическая стенка. Пусть имеется трехслойная труба, у которой внутренний диаметр равен d_4 , диаметры слоев d_1, d_2, d_3 , температура внутренней поверхности стенки равна t'_{CT} , наружной t''_{CT} , коэффициенты теплопроводности слоев соответственно $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$. Температура каждого слоя изменяется по логарифмической кривой и через них проходит один и тот же тепловой поток.

Из уравнений теплового потока для каждого слоя, разрешив их относительно разностей температур и почленно сложив, получим:

$$t'_{CT} - t''_{CT} = \frac{Q}{2\pi l} \left(\frac{1}{\lambda_1} \ln d_2/d_1 + \frac{1}{\lambda_2} \ln d_3/d_2 + \frac{1}{\lambda_3} \ln d_4/d_3 \right),$$

откуда находится величина Q . Для многослойной цилиндрической стенки с n слоями:

$$Q = \frac{2\pi l(t'_{CT} - t''_{CT})}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}}.$$

Температуры между слоями находятся по формулам $t'_{CI} = t'_{CT} - \frac{Q}{2\pi \lambda_1 l} \ln \frac{d_2}{d_1}$ и

т. д.

Пример. Стальная труба (коэффициент теплопроводности $\lambda_1 = 50 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{град})$ $d_1/d_2 = 100/110 \text{ мм}$) покрыта двумя слоями изоляции. Толщина первого слоя составляет $\delta_2 = 5 \text{ мм}$ с $\lambda_2 = 0,2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{град})$, второго 10 мм с $\lambda_3 = 0,1 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{град})$. Температура внутренней поверхности трубы $t'_{CT} = 150^\circ \text{С}$, наружной поверхности изоляции $t''_{CT} = 28^\circ \text{С}$.

Требуется найти потери теплоты через изоляцию с одного метра трубы и температуры на границе слоев.

Имеем:

$$q_l = \frac{Q}{t} = \frac{2\pi(t'_{CT} - t''_{CT})}{\frac{1}{\lambda_1} \ln d_2/d_1 + \frac{1}{\lambda_2} \ln d_3/d_2 + \frac{1}{\lambda_3} \ln d_4/d_3} = \frac{2 \cdot 3,14(150 - 28)}{2,3 \left(\frac{1}{50} \lg 0,11/0,1 + \frac{1}{0,2} \lg 0,12/0,11 + \frac{1}{0,1} \lg 0,14/0,12 \right)} = 387 \text{ Вт/м.}$$

Температура между слоями изоляции:

$$t'_{cл} = t'_{CT} - \frac{q_l}{2\pi\lambda_1} \ln d_2/d_1 = 150 - \frac{387}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} \ln \frac{0,11}{0,1} \cong 150^\circ \text{C.}$$

$$t''_{cл} = t'_{cл} - \frac{q_l}{2\pi\lambda_2} \ln d_3/d_2 = 150 - \frac{387}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,2} \ln \frac{0,12}{0,11} \cong 123^\circ \text{C.}$$

Рассмотрим процесс теплопередачи через плоскую однослойную стенку при граничных условиях третьего рода (рис. 4.5).

При теплопередаче теплота передается всеми тремя способами: теплопроводностью, конвекцией и излучением. Первый этап теплопередачи при наличии стенки – перенос теплоты конвекцией от горячего теплоносителя к стенке. Конвекция сопровождается теплопроводностью и излучением. На втором этапе осуществляется перенос теплоты теплопроводностью через стенку (если материал стенки пористый, то теплопроводность связана с конвекцией и излучением в порах). Третий этап связан переносом теплоты конвекцией от второй поверхности стенки к холодному теплоносителю, что также сопровождается теплопроводностью и излучением.

Количество теплоты, передаваемое конвекцией, определяется уравнением Ньютона-Рихмана:

$$Q = \alpha_1 F (t_1 - t'_{CT}),$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи от горячего теплоносителя с температурой t_1 к поверхности стенки;

F – расчетная поверхность плоской стенки, м².

Тепловой поток, переданный теплопроводностью, через стенку равен

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} F (t'_{CT} - t''_{CT}).$$

Тепловой поток от второй поверхности стенки к холодному теплоносителю:

$$Q = \alpha_2 F (t''_{CT} - t_2),$$

где α_2 – коэффициент теплоотдачи от второй поверхности стенке к среде с температурой t_2 .

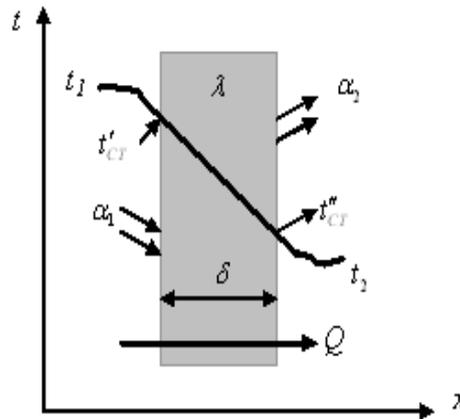


Рис.4.5. Схема теплопередачи через плоскую однослойную стенку

Все три величины Q одинаковы – сколько теплоты воспринимает стенка, столько она и отдает в стационарном режиме, поэтому, решая все три уравнения относительно разностей температур и складывая их почленно, получим:

$$Q = \frac{F(t_1 - t_2)}{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}\right)} \text{ или } Q = kF(t_1 - t_2),$$

где $k = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}\right)}$ – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·град).

$$\text{Плотность теплового потока } q = \frac{(t_1 - t_2)}{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}\right)} = k(t_1 - t_2).$$

Коэффициент теплопередачи k выражает количество теплоты, проходящее через единицу поверхности стенки в единицу времени от горячего к холодному теплоносителю при разности температур между ними в 1°С.

Величина, обратная коэффициенту теплопередачи, называется общим термическим сопротивлением R .

Известно, что тепловые потери снижаются пропорционально увеличению толщины изоляционного слоя, поэтому для тепловой изоляции должны использоваться материалы с низким коэффициентом теплопроводности.

Критический диаметр слоя изоляции не зависит от диаметра трубопровода, он будет тем меньше, чем меньше коэффициент теплопроводности изоляции и чем больше коэффициент теплоотдачи α_2 ; $d_{кр} = d_{из} = 2\lambda_{из} / \alpha_2$. Для эффективной работы изоляции необходимо, чтобы критический диаметр был меньше внешнего диаметра оголенного трубопровода.

Пример. Для изоляции патрубка продуктопровода диаметром 30 мм имеется изоляционный материал с коэффициентом теплопроводности $\lambda_{из} = 0,1 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{град})$. Коэффициент теплоотдачи составляет $\alpha_2 = 4 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{град})$.

Определить целесообразность применения данного изоляционного материала. Критический диаметр изоляции $d_{кр} = 2\lambda_{из} / \alpha_2 = 2 \cdot 0,1 / 4 = 0,05 \text{ м}$.

Поскольку $d_{кр} > d_2$ данный материал применять нецелесообразно.

Ребристые поверхности в машинах и аппаратах пищевых производств применяют для выравнивания термических сопротивлений теплоотдачи с обеих сторон стенки, например, когда с одной стороны стенки находится жидкость с большим коэффициентом теплоотдачи, а с другой газ с малым коэффициентом, создающим значительное термическое сопротивление. Поэтому оребрение стенки со стороны большего термического сопротивления позволяет увеличить поверхность соприкосновения с теплоносителем и увеличить тем самым тепловой поток.

Коэффициент эффективности ребер равен отношению количества теплоты, передаваемой поверхностью ребер в окружающую среду, к теплоте, которую эта поверхность могла бы передать при постоянной температуре, равной температуре у основания ребер $\eta_{э} = Q_P / Q_{пр}$. Отношение оребренной поверхности F_2 к гладкой F_1 называется коэффициентом оребрения.

Пример. Пусть имеется стенка толщиной $\delta = 8 \text{ мм}$, коэффициент оребрения которой равен $F_2 / F_1 = 10$. Материал стенки серый чугун, коэффициент теплопроводности которого равен $\lambda = 63 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{град})$. Коэффициент теплоотдачи от рабочего тела к стенке $\alpha_1 = 250 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{град})$ и $\alpha_2 = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{град})$. Температура рабочего тела $t_1 = 100^\circ\text{C}$, температура

окружающей среды $t_2 = 20^{\circ} \text{C}$.

Коэффициент теплопередачи при отнесении теплового потока к гладкой поверхности:

$$k_{pr} = 1 / \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \frac{F_1}{F_2} \right) = 1 / \left(\frac{1}{250} + \frac{0,008}{63} + \frac{1}{10 \cdot 10} \right) = 71 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град}).$$

Плотность теплового потока $q = k_{pr}(t_1 - t_2) = 71(100 - 20) = 5680 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

Коэффициент теплопередачи при условии плоской стенки

$$k = 1 / \left(\frac{1}{250} + \frac{0,008}{63} + \frac{1}{10} \right) = 9,95 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град}).$$

Плотность теплового потока для плоской стенки $q = 9,95 \cdot 80 = 796 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

Можно видеть, что оребрение увеличивает теплопередачу примерно в $5680/796 = 7$ раз.

4.3. Основные сведения о конвективном теплообмене

Перенос теплоты при конвекции осуществляется перемешивающимися объемами жидкой или газообразной среды, при этом передача теплоты конвекцией сопровождается теплопроводностью.

При движении среды встречаются два вида потока. В потоке первого вида все частицы среды движутся по параллельным траекториям, и их движение длительное время совпадает с направлением всего потока. Движение такого рода называется *ламинарным*. Второй вид потока называется *турбулентным*. В нем постоянно происходит перемешивание слоев и каждая частица, находящаяся в таком потоке, перемещаясь вдоль потока, совершает различные движения относительно стенок канала.

Характер движения среды в канале произвольного сечения определяется безразмерной величиной, называемой числом Рейнольдса и равной:

$$\text{Re} = \varpi d_{\text{ЭКВ}} / \nu,$$

где ϖ – средняя скорость движения среды, м/с;

$d_{\text{ЭКВ}}$ – эквивалентный диаметр, м;

ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с.

При $Re \leq 2000$ поток в трубопроводе остается ламинарным.

Характер движения среды оказывает влияние на интенсивность теплопередачи. При ламинарном режиме и отсутствии естественной конвекции теплота в перпендикулярном к стенке направлении передается только за счет теплопроводности. И ее количество зависит от физических свойств среды, размеров и формы поверхности канала и почти не зависит от скорости движения среды. При турбулентном движении перенос теплоты к стенкам канала осуществляется конвекцией и теплопроводностью.

В качестве теплоносителей используются различные вещества: воздух, вода, газы, масла, расплавы металлов и т.п. При конвективном теплообмене большое значение, помимо коэффициента теплопроводности λ , удельной теплоемкости c , коэффициента температуропроводности a , плотности ρ , имеет вязкость среды. Различают динамическую вязкость, характеризующуюся силами внутреннего трения между слоями движущейся жидкости, и кинематическую вязкость, равную отношению динамической вязкости к плотности жидкости.

Величина силы трения S между слоями, отнесенная к единице поверхности, согласно закону Ньютона пропорциональна градиенту скорости $d\omega/dn$ по нормали к направлению движения потока:

$$S = \mu(d\omega/dn),$$

где μ – коэффициент динамической вязкости (коэффициент внутреннего трения), Н·с/м².

С увеличением μ вязкость жидкостей возрастает, у капельных сред вязкость уменьшается с увеличением температуры и почти не зависит от давления, у газов вязкость возрастает при увеличении температуры и давления.

Кинематический коэффициент вязкости $\nu = \mu/\rho$, м²/с.

Теоретический анализ задач конвективного теплообмена основывается на использовании теории пограничного слоя Л. Прандтля. При омывании какого-либо тела безграничным потоком жидкости с постоянной скоростью течения в непосредственной близости от поверхности тела скорость течения падает до

нуля. Тонкий слой вблизи поверхности, в котором происходит изменение скорости от скорости потока вдали от стенки до нуля на стенке, называется пограничным динамическим слоем. Толщина этого слоя увеличивается с увеличением динамической вязкости и уменьшается с увеличением скорости потока жидкости. Характер течения в пограничном слое определяется величиной числа Re .

При тепловом воздействии, когда температуры стенки и жидкости неодинаковы, вблизи стенки возникает еще и тепловой пограничный слой. Соотношение толщин динамического и теплового пограничных слоев определяется величиной безразмерного числа $Pr = \nu/a$. Так, для вязких жидкостей с низкой теплопроводностью (масел) $Pr > 1$ и толщина динамического слоя больше толщины теплового пограничного слоя. Для газов $Pr \approx 1$ и толщины слоев примерно равны.

В случае турбулентного динамического пограничного слоя непосредственно у стенки имеется тонкий слой жидкости, движение в котором является ламинарным. Этот слой называется ламинарным (вязким) подслоем.

При конвективном теплообмене механизм теплоотдачи определяется во многом характером течения. Процесс переноса теплоты на границе с поверхностью определяется законом Фурье:

$$dQ = -\lambda dF \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_{n=0},$$

где n – нормаль к поверхности тела.

Это же количество может быть выражено уравнением Ньютона-Рихмана $dQ = \alpha dF (t_{ж} - t_{СТ})$. Приравняв правые части обоих уравнений, получим:

$$-\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_{n=0} = \alpha \Delta t .$$

Это уравнение описывает процесс теплообмена на поверхности канала ($n = 0$).

Конвективный теплообмен зависит от значительного числа факторов, определяющих процесс теплоотдачи и в общем случае является функцией физических параметров жидкости, характера и скорости ее течения, формы и

размеров тела и т.п., т.е.

$$\alpha = f(\omega, \lambda, \mu, \rho, c, \Omega, \Delta t, L, \Phi),$$

где Ω – характер движения жидкости;

Φ, L – форма и размеры поверхности соответственно.

Дифференциальные уравнения для конвективного теплообмена учитывают как тепловые, так и динамические явления процесса. Система уравнений состоит из уравнений энергии (теплопроводности), теплообмена, движения и сплошности.

При определении величины теплового потока необходимо знать значение температуры, которая в большинстве случаев распределяется неравномерно по сечению канала и по его длине. Поэтому при теоретических исследованиях под температурой понимают среднюю температуру, например, при небольших изменениях температуры потока средняя температура равна:

$$t_{ж} = 0,5(t' + t''),$$

где t' – средняя температура жидкости у входа в канал;

t'' – тоже у выхода

Для определения коэффициента теплоотдачи в расчет принимают среднюю скорость жидкости:

$$\varpi = \frac{1}{F} \int_F \omega dF = V / F,$$

где F – площадь поперечного сечения канала, м^2 ;

V – объемный расход жидкости, $\text{м}^3/\text{с}$;

ω – скорость жидкости в каждом элементе сечения dF .

При проведении инженерных расчетов для каналов некруглого сечения вместо диаметра принимается так называемый эквивалентный диаметр, равный:

$$d_{\text{ЭКВ}} = 4F / S,$$

где S – полный (смоченный) периметр сечения.

При поперечном обтекании трубы или пучка труб за определяющий размер берется наружный диаметр трубы, а при обтекании плоскости – ее длина

по направлению движения потока

Теплообмен при ламинарном течении жидкости в трубе.

Формирование характера потока в трубе происходит на начальном ее участке. При входе скорости по сечению распределяются равномерно. Далее происходит образование гидродинамического пограничного слоя, толщина которого постепенно увеличивается. Стабилизированное течение, характерное для данного режима течения наступает как для ламинарного, так и для турбулентного течения примерно на длине равной $50d$.

Теплоотдача при течении жидкости в трубе неодинакова по длине, поэтому кроме участка стабилизированного течения устанавливается участок тепловой стабилизации.

При ламинарном изотермном течении жидкости скорости по сечению потока на расстоянии r_x от оси трубы распределяются по параболе:

$$\omega = \omega_{MAX} \left(1 - r_x^2 / r^2\right),$$

где ω_{MAX} – скорость жидкости на оси трубы ($r_x = 0$);

r – радиус трубы.

Средняя скорость при ламинарном сечении $\bar{\omega} = 0,5\omega_{MAX}$.

При ламинарном течении могут быть два режима неизотермного движения:

– *вязкостный режим*, соответствующий течению вязких жидкостей при отсутствии естественной конвекции. При этом режиме передача теплоты к стенкам канала осуществляется только теплопроводностью. Распределение скоростей по сечению не будет чисто параболическим, поскольку с изменением температуры будет изменяться и вязкость;

– *вязкостно-гравитационный режим* имеет место, когда вынужденное течение жидкости сопровождается естественной конвекцией. В этом случае теплота передается теплопроводностью и конвекцией.

При вязкостно-гравитационном режиме большое значение оказывает направление свободной конвекции и вынужденного движения. При совпадении

направления свободной конвекции и вынужденного движения скорость жидкости у стенки возрастает и теплоотдача увеличивается, в противном случае – наоборот. При взаимно перпендикулярном движении естественной и вынужденной конвекций теплоотдача увеличивается за счет лучшего перемешивания.

Аналитическое исследование теплоотдачи при ламинарном режиме пока не нашло окончательного разрешения и при определении коэффициента теплоотдачи используют эмпирические зависимости:

– при вязкостном режиме средний коэффициент теплоотдачи в прямых гладких трубах определяется по формуле:

$$\bar{Nu}_{ж,d} = 0,15 Re_{ж,d}^{0,33} Pr_{ж}^{0,43} (Pr_{ж}/Pr_{СТ})^{0,25};$$

– при вязкостно-гравитационном режиме средний коэффициент теплоотдачи в прямых гладких трубах:

$$\bar{Nu}_{ж,d} = 0,15 Re_{ж,d}^{0,33} Pr_{ж}^{0,43} Gr_{ж,d}^{0,1} (Pr_{ж}/Pr_{СТ})^{0,25}.$$

После определения числа Нуссельта коэффициент теплоотдачи определяется по формуле $\bar{\alpha} = \bar{Nu} \lambda / d$, где за определяющую температуру взята средняя температура жидкости, а за определяющий размер диаметр трубы. Эти формулы дают среднее значение коэффициента теплоотдачи при $l/d > 50$ и использовании любой жидкости.

Пример. Требуется определить коэффициент теплоотдачи и количество переданной теплоты при течении воды в горизонтальной трубке диаметром 8 мм и длиной 500 мм, если скорость воды 0,1 м/с, температура воды 80°, температура стенки трубки 20°С.

При $t_{ж} = 80^{\circ} \text{C}$ $\lambda_{ж} = 0,675 \text{ Вт/(м}\cdot\text{град)}$, $\nu_{ж} = 0,365 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, $\beta_{ж} = 6,32 \cdot 10^{-4} \text{ 1/град}$, число Прандтля $Pr_{ж} = 2,21$, $Pr_{СТ} = 7,02$ при $T_{СТ} = 293^{\circ} \text{K}$.

Имеем

$$Re_{ж,d} = \omega d / \nu = (0,1 \cdot 0,008 \cdot / 0,365 \cdot 10^{-6} = 2190;$$

$$Re_{ж,d}^{0,33} = 13,2; \quad Pr_{ж}^{0,43} = 1,4; \quad (Pr_{ж}/Pr_{СТ})^{0,25} = 0,75.$$

Температурный напор $\Delta t = t_{ж} - t_{СТ} = 60^{\circ} \text{C}$.

Число Грасгофа:

$$Gr_{ж,d} = \frac{gd^3 \beta \Delta t}{\nu^2} = \frac{9,81 \cdot 0,008^3 \cdot 6,32 \cdot 10^{-4} \cdot 60}{(0,365 \cdot 10^{-6})^2} = 1,43 \cdot 10^6; \quad Gr_{ж,d}^{0,1} = 4,12.$$

Находим

$$\bar{Nu}_{ж,d} = 0,15 Re_{ж,d}^{0,33} Pr_{ж,d}^{0,43} Gr_{ж,d}^{0,1} (Pr_{ж,d}/Pr_{СТ})^{0,25} = 0,15 \cdot 13,2 \cdot 1,4 \cdot 4,12 \cdot 0,75 = 8,56.$$

Коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = \bar{Nu}_{ж,d} \frac{\lambda_{ж}}{d} = \frac{8,56 \cdot 0,675}{0,008} = 724 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град}).$$

Поправка на длину трубы не требуется, так как $l/d > 50$.

Количество передаваемой теплоты через трубу:

$$Q = \pi d l \alpha (t_{ж} - t_{СТ}) = 3,14 \cdot 0,008 \cdot 0,5 \cdot 724 \cdot 60 = 56 \text{ Вт}.$$

Теплообмен при турбулентном движении жидкости в трубах.

Сложное строение потока при турбулентном движении жидкости в трубе с ламинарным подслоем, представляющим термическое сопротивление, затрудняет аналитическое описание процесса теплообмена. Распределение скоростей по сечению имеет вид усеченной параболы: наиболее резко скорость потока изменяется около стенки в пределах пограничного слоя и более полого в средней части сечения.

В практических расчетах используют средние скорости $\bar{\omega}$. При турбулентном режиме при изотермном течении отношение средней скорости к максимальной является функцией числа Рейнольдса:

$$\bar{\omega} / \omega_{\text{MAX}} = f(\text{Re}) \approx 0,8 \dots 0,9.$$

Поскольку при турбулентном режиме происходит интенсивное перемешивание, то естественная конвекция не оказывает практического влияния на теплоотдачу. Поэтому из совокупности чисел подобия исключается число Грасгофа.

При нагревании жидкости интенсивность теплоотдачи выше, чем при охлаждении, что учитывается отношением $(Pr_{ж,d}/Pr_{СТ})^{0,25}$.

Средний коэффициент теплоотдачи при турбулентном движении ($Re_{ж,d} > 10^4$) и $l/d > 50$ определяется как:

$$\bar{Nu}_{ж,d} = 0,021Re^{0,8}_{ж,d} Pr_{ж}^{0,43} (Pr_{ж}/Pr_{СТ})^{0,25}.$$

Формула справедлива при $Pr_{ж} = 0,6...2500$.

При турбулентном движении в изогнутых трубах и змеевиках возникает вследствие центробежного эффекта вторичная циркуляция, что приводит к увеличению коэффициента теплоотдачи и учитывается соответствующим поправочным коэффициентом.

Теплообмен при поперечном обтекании трубы. Безотрывное обтекание поверхности трубы потоком наблюдается при малых значениях числа $Re < 5$. При больших значениях Re ламинарный пограничный слой на лобовой части трубы отрывается от ее поверхности и за кормовой частью образует два симметричных вихря. Поэтому примерно 45 % поверхности трубы омывается безотрывно ($\varphi = 80...85^0$), а остальная часть находится в вихревой зоне. Чем больше скорость потока, тем при больших углах происходит отрыв ламинарного пограничного слоя.

В лобовой части трубы при $\varphi = 0$ коэффициент теплоотдачи имеет наибольшее значение, так как пограничный слой имеет здесь наименьшую толщину. По мере движения жидкости толщина слоя увеличивается и достигает максимального значения у экватора, примерно в месте отрыва пограничного слоя. За экватором кормовая часть трубы обтекается жидкостью с вихревым характером движения, что способствует разрушению пограничного слоя и ведет к увеличению коэффициента теплоотдачи.

Теплоотдача по окружности трубы при поперечном обтекании связана с характером обтекания ее поверхности и зависит от скорости и направления потока жидкости, температуры и диаметра трубы, направления теплового потока и других внешних элементов, изменяющих степень турбулизации потока и аналитически трудно разрешима. Поэтому в исследовательской практике средний коэффициент теплоотдачи по окружности трубы определяют из уравнения подобия:

При $Re = 5...1 \cdot 10^3$:

$$\bar{Nu}_{ж,d} = 0,5 Re^{0,5}_{ж,d} Pr_{ж}^{0,38} (Pr_{ж}/Pr_{СТ})^{0,25}.$$

При $Re = 1 \cdot 10^3 \dots 2 \cdot 10^5$:

$$\bar{Nu}_{ж,d} = 0,25 Re^{0,6}_{ж,d} Pr_{ж}^{0,38} (Pr_{ж}/Pr_{СТ})^{0,25}.$$

При угле атаки меньше 90^0 , то подсчитанный для 90^0 средний коэффициент теплоотдачи умножается на поправочный коэффициент $\varepsilon_{\psi} = 0,55 \dots 0,98$.

Теплообмен при поперечном обтекании пучка труб. Теплообменные аппараты, содержащие пучки круглых труб, обтекаемые поперечным потоком жидкости, имеют в пищевой промышленности широкое распространение. В теплообменных аппаратах используются в основном два вида установки труб в решетках: коридорный и шахматный.

Характеристиками пучка труб являются: внешний диаметр, число рядов труб по движению потока, относительные шаги по вертикали и горизонтали. В теплообменных аппаратах наблюдается в основном турбулентное течение жидкости. При обтекании первого ряда труб независимо от вида их расположения в решетке режим движения практически не отличается от обтекания одиночной трубы и зависит только от начальной турбулентности потока. При обтекании следующих рядов характер изменяется. Так, при коридорном расположении последующий ряд труб закрывается предыдущим, что ухудшает обтекание лобовой части, и большая поверхность труб находится в слабой вихревой зоне. При шахматном расположении труб коэффициент теплоотдачи при прочих равных условиях выше, чем при коридорном их расположении.

При коридорном расположении труб теплоотдача, как в лобовой, так и в кормовой частях труб будет меньшей, чем при обтекании одиночной трубы. Поскольку каждый ряд вызывает дополнительную турбулизацию, то коэффициент теплоотдачи для второго ряда будет выше, чем для первого, а для третьего выше, чем для второго. После третьего ряда происходит стабилизация потока жидкости и коэффициент теплоотдачи для остальных рядов примерно

постоянен.

При расчете теплообменных аппаратов для определения среднего коэффициента теплоотдачи третьего ряда труб применяются следующие уравнения подобия:

При коридорном расположении труб в решетке:

$$\bar{Nu}_{ж,d} = 0,26 Re_{ж,d}^{0,65} Pr_{ж}^{0,33} (Pr_{ж}/Pr_{СТ})^{0,25} \cdot \varepsilon_s ;$$

При шахматном расположении труб:

$$\bar{Nu}_{ж,d} = 0,41 Re_{ж,d}^{0,6} Pr_{ж}^{0,38} (Pr_{ж}/Pr_{СТ})^{0,25} \cdot \varepsilon_s ,$$

где ε_s – поправочный коэффициент для глубинных рядов пучка, выбираемый в зависимости от отношения s_1/s_2 .

Значение коэффициента теплоотдачи для труб первого ряда определяется умножением коэффициента теплоотдачи для третьего ряда на поправочный коэффициент $\varepsilon_1 = 0,6$, для труб второго ряда на $\varepsilon_2 = 0,7$ (для коридорного расположения труб $\varepsilon_2 = 0,9$).

Среднее значение коэффициента теплоотдачи для всего пучка подсчитывается по формуле:

$$\bar{\alpha} = \frac{\bar{\alpha}_1 F_1 + \bar{\alpha}_2 F_2 + \dots}{F_1 + F_2 + \dots},$$

где $\bar{\alpha}_i$ – средние коэффициенты теплоотдачи в отдельных рядах труб;

F_i – поверхности нагрева каждого ряда.

Если пучок обтекается потоком, направленным под углом меньшим 90^0 , то коэффициент теплоотдачи умножается на поправочный коэффициент $\varepsilon_\psi = 0,42 \dots 0,98$.

Теплообмен при свободном движении. Конвективный теплообмен в свободном потоке возникает от изменения плотности жидкости или газа при нагревании. Свободная конвекция наблюдается, например, в холодильных камерах при охлаждении продуктов, у нагретых поверхностей печей и сушилок, у батарей отопления и т.д.

Возникающее свободное движение может быть ламинарным или

турбулентным. Характер движения зависит в основном от температурного напора

$$\Delta t = t_{CT} - t_{ж},$$

где t_{CT} – температура нагретой поверхности;

$t_{ж}$ – температура неподвижной жидкости вдали от поверхности.

Аналитические решения задач по определению теплоотдачи при свободном ламинарном или турбулентном движении получены при целом ряде упрощающих допущений и поэтому широкого практического использования не получили. Определение коэффициента теплоотдачи осуществляется в основном экспериментальным путем.

Для определения средних коэффициентов теплоотдачи при свободном ламинарном движении жидкости вдоль вертикальных стенок используется следующее эмпирическое уравнение подобия:

при $t_{CT} = const$:

$$\bar{Nu}_l = 0,63(Gr_l \cdot Pr)^{0,25}.$$

При $q_{CT} = const$:

$$\bar{Nu}_{ж,l} = 0,75(Gr_{ж,l} \cdot Pr_{ж})^{0,25} (Pr_{ж}/Pr_{CT})^{0,25}.$$

Формулы получены для теплоносителей с числом Прандтля от 0,7 до $3 \cdot 10^3$ и ими можно пользоваться при $10^3 < Gr_{ж,l} \cdot Pr_{ж} < 10^8$

Средний коэффициент теплоотдачи при турбулентном движении жидкости вдоль вертикальной стенки определяется из уравнения подобия:

$$\bar{Nu}_{ж,l} = 0,15(Gr_{ж,l} \cdot Pr_{ж})^{0,33} (Pr_{ж}/Pr_{CT})^{0,25}.$$

Для определения средних коэффициентов теплоотдачи при свободном ламинарном движении жидкости около горизонтальных труб используется выражение:

$$\bar{Nu}_{ж,l} = 0,5(Gr_{ж,d} Pr_{ж})^{0,25} (Pr_{ж}/Pr_{CT})^{0,25}.$$

Пример. Требуется определить передачу теплоты при свободной конвекции от вертикального трубопровода диаметром 120 мм и высотой 2,5 м к воздуху при температуре стенки 520^0K и воздуха 293^0K .

При температуре окружающей среды 293^0K имеем $\lambda_{ж} = 0,026 \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{град})$, $\text{Pr}_{ж,d} = 0,703$; $\text{Pr}_{ж}/\text{Pr}_{ст} = 1$; $\nu_{ж} = 15,06 \cdot 10^{-6} \text{м}^2/\text{с}$.

Число Грасгофа :

$$G_{ж,d} = \frac{gh^3\beta\Delta T}{\nu^2} = \frac{9,81 \cdot 2,5^3 \cdot 230 \cdot 10^{12}}{293 \cdot 15,06^2} = 0,5 \cdot 10^{12}; \quad Gr_{ж,d}^{0,1} \cdot \text{Pr}_{ж,d} = 0,5 \cdot 10^{12} \cdot 0,703 = 0,35 \cdot 10^{12}$$

При этих условиях движение воздуха турбулентно.

$$\bar{Nu}_{ж,d} = 0,15(Gr \cdot \text{Pr})_{ж,d}^{0,33} = 0,15 \cdot (0,35 \cdot 10^{12})^{0,33} = \dots$$

Коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = Nu_{ж,d} \lambda_{ж} / h = \dots$$

Потери теплоты трубопроводом:

$$Q = \alpha F (T_{ст} - T_{ж}) = \dots \cdot 3,14 \cdot 0,12 \cdot 2,5 \cdot 230 = \dots \text{Вт}.$$

4.4. Передача теплоты излучением

Источником теплового излучения является внутренняя энергия нагретого тела, и ее количество зависит от физических свойств и температуры тела. Электромагнитные волны, передающие энергию, различаются длиной волны и частотой колебаний. Для теплопередачи излучением наибольший интерес представляют волны с $\lambda = 0,8 \dots 40 \text{мкм}$.

При различных температурах между телами существует непрерывный теплообмен излучением. При температурном равновесии количество излученной энергии равно количеству поглощенной энергии. Спектр излучения твердых и жидких тел непрерывен и они испускают лучи всех длин волн. У газообразных тел присутствует селективное объемное излучение и спектр излучения у них линейчатый.

Суммарное излучение с поверхности тела по всем направлениям и всем длинам волн спектра называется интегральным излучением Q . Плотность интегрального излучения тела равна интегральному лучистому потоку с единицы поверхности, $E = dQ/dF$, $\text{Вт}/\text{м}^2$.

Любое физическое тело способно излучать, поглощать и отражать

энергию излучения от другого тела.

Поток лучистой энергии – это энергия излучения, проходящая через некоторую площадку в единицу времени или излучаемая источником в единицу времени.

Под *плотностью излучения* $B_e = \frac{d^2\Phi_e}{\cos\beta ds d\omega}$ понимается поток лучистой энергии Φ_e , проходящий через элемент площади ds в определенном направлении, образующем угол β с нормалью к поверхности. Поток относится к элементу телесного угла $d\omega$.

Интенсивность излучения $I_e = d\Phi_e / d\omega$ – это поток лучистой энергии от источника излучения в элемент телесного угла.

Общее количество энергии излучения, приходящейся на тело равно:

$$Q = Q_A + Q_R + Q_D,$$

где Q_A – часть поглощенной энергии;

Q_R – часть отраженной энергии;

Q_D – часть энергии, прошедшей через тело.

Величина A называется поглотительной способностью, представляющей отношение поглощенной энергии излучения к общему количеству энергии. Величина R называется отражательной способностью, а величина D – пропускательной способностью. Для большинства твердых тел $A + R = 1$.

Для сравнения с реальными поверхностями вводятся понятия об абсолютно черной, абсолютно белой и абсолютно прозрачной поверхностях.

Абсолютно черная поверхность – это поверхность, у которой $A = 1, R = 0, D = 0$.

Абсолютно белая поверхность – $A = 0, R = 1, D = 0$.

Абсолютно прозрачная $A = 0, R = 0, D = 1$. Например, кварц для тепловых лучей непрозрачен и прозрачен для ультрафиолетовых лучей и лучей видимого спектра. Свойства тел поглощать или отражать тепловые лучи зависит от состояния поверхности.

Если падающий луч при отражении разделяется на множество лучей по разным направлениям, то данное отражение в отличие от зеркального называется диффузным.

Спектральная интенсивность излучения представляет собой плотность потока излучения для волн длиной от λ до $\lambda + d\lambda$, отнесенную к рассматриваемому интервалу длин волн.

Если тело участвует в теплообмене излучением с другими телами, то на него падает извне энергия излучения в количестве E_n . Часть этой энергии в количестве AE_n телом поглощается и превращается в его внутреннюю энергию, остальная часть RE_n отражается от тела. Сумма собственного и отраженного излучений называется эффективным излучением:

$$E_e = E_c + RE_n = E_c + (1 - A)E_n.$$

Эффективное излучение зависит от физических свойств и температуры тела, от свойств, температуры и спектра излучения других окружающих тел., а также от формы, размеров и относительного расположения тел в пространстве. Поэтому физические свойства эффективного и собственного излучений неодинаковы и спектры их различны.

Теплообмен между параллельными плоскими пластинами. Пусть размеры пластин значительно больше расстояния между ними. Обозначим T_1, T_2 – температуры пластин, A_1, A_2 – коэффициенты поглощения пластин, E_1, E_2 – собственные излучения пластин, E_{1e}, E_{2e} – эффективные излучения пластин, C_1, C_2 – коэффициенты излучения.

Суммарный поток излучения первой и второй пластин находим из уравнений:

$$E_{1e} = E_1 + (1 - A_1)E_{2e} \quad \text{и} \quad E_{2e} = E_2 + (1 - A_2)E_{1e},$$

откуда

$$E_{1e} = \frac{E_1 + E_2 - A_1 E_2}{A_1 + A_2 - A_1 A_2} \quad \text{и} \quad E_{2e} = \frac{E_1 + E_2 - A_2 E_1}{A_1 + A_2 - A_1 A_2}.$$

Тепловое излучение, получаемое второй пластиной, равно $q = E_{1e} - E_{2e}$.

Подставив соответствующие значения и выполнив соответствующие преобразования, получим:

$$q = \frac{(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_s}}$$

Тепловое излучение между пластинами определяется уравнением:

$$Q = C_n [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] F,$$

где $C_n = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_s}}$ – приведенный коэффициент излучения;

$C_s = 5,77 \text{ Вт}/[\text{м}^2(\text{°К})^4]$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела.

Пример. Имеются две параллельно расположенные поверхности с температурами $T_1 = 800^\circ \text{К}$ и $T_2 = 300^\circ \text{К}$, коэффициенты излучения которых равны соответственно $C_1 = 5,15 \text{ Вт}/[\text{м}^2(\text{°К})^4]$ и $C_2 = 4,25 \text{ Вт}/[\text{м}^2(\text{°К})^4]$. Требуется определить теплообмен излучением между поверхностями при условии, что при полировании второй поверхности коэффициент излучения ее стал равен $C_2 = 0,5 \text{ Вт}/[\text{м}^2(\text{°К})^4]$.

$$\text{Имеем } q = \frac{(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_s}} = \frac{1}{\frac{1}{5,15} + \frac{1}{4,25} - \frac{1}{5,77}} [(800/100)^4 - (300/100)^4] = 16060$$

$\text{Вт}/\text{м}^2$.

Теплообмен между поверхностями при условии, что $C_2 = 0,5 \text{ Вт}/[\text{м}^2(\text{°К})^4]$.

$$q = \frac{(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_s}} = \frac{1}{\frac{1}{5,15} + \frac{1}{0,5} - \frac{1}{5,77}} [(800/100)^4 - (300/100)^4] = 2008 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

Можно видеть, что дополнительная отделка второй поверхности приводит к уменьшению теплообмена излучением в 8 раз.

Теплообмен между расположенными друг в друге телами. Рассмотрим задачу теплообмена между телами, когда одно из них помещено внутри другого. Такого рода задачи часто встречаются в практике при установке инфракрасных излучателей внутри цилиндра или шара (рис.4.6).

Обозначим параметры внутреннего тела $A_1, C_1, \varepsilon_1, T_1, F_1$ и параметры внешнего тела $A_2, C_2, \varepsilon_2, T_2, F_2$. Эффективное излучение внутреннего тела состоит из собственного излучения и отраженного излучения, полученного от внешнего тела $E_{1e} = E_1 F_1 + (1 - A_1) \varphi E_{2e}$. Эффективное излучение внешнего тела состоит из собственного излучения, отраженного от внутреннего тела, и отраженного собственного излучения $E_{2e} = E_2 F_2 + (1 - A_2) E_{1e} + (1 - A_2)(1 - \varphi) E_{2e}$.

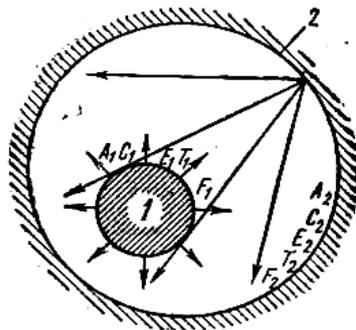


Рис.4.6. Схема теплообмена излучением между телами 1 и 2

Величина теплообмена излучением равна $Q = E_{1e} - E_{2e}$, откуда получаем, учитывая, что $\varphi = F_1 / F_2$, $Q = \frac{[(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] F_1}{\frac{1}{C_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_s} \right)}$ или $Q = C_n F_1 [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4]$.

Если поверхность F_1 мала по сравнению с F_2 , то отношение $F_1 / F_2 \rightarrow 0$ и $C_n = C_1$.

При проектировании новых теплообменных аппаратов целью теплового расчета является определение поверхности теплообмена или определение конечных температур теплоносителей. Основными расчетными уравнениями теплообмена при стационарном режиме являются уравнение теплопередачи, рассмотренное выше и уравнение теплового баланса.

Уравнение теплового баланса при условии отсутствия тепловых потерь и фазовых переходов определяется следующей зависимостью:

$$Q = V_1 \rho_1 c_{p1} (t_1' - t_1'') = V_2 \rho_2 c_{p2} (t_2'' - t_2') \quad \text{или} \quad (t_1' - t_1'') / (t_2'' - t_2') = W_2 / W_1,$$

где $W_i = V_i \rho_i c_{pi}$ – условный эквивалент.

4.5. Аппараты для нагрева и охлаждения продуктов

Для нагрева и охлаждения жидких сред в пищевых производствах используются различные конструкции теплообменных аппаратов (теплообменников) – рубашечные, трубчатые, пластинчатые, кожуховые, погружные, оросительные и др.

Основные требования, предъявляемые к теплообменным аппаратам:

- соблюдение стабильных условий протекания тепловых процессов;
- высокий коэффициент теплопередачи;
- низкое гидравлическое сопротивление аппарата;
- повышенная коррозионная стойкость;
- доступность поверхностей для чистки;
- технологичность изготовления аппарата;
- низкая удельная металлоемкость.

При проектировании новых теплообменных аппаратов целью теплового расчета является определение поверхности теплообмена или определение конечных температур теплоносителей. Основными расчетными уравнениями теплообмена при стационарном режиме являются уравнение теплопередачи, рассмотренное выше и уравнение теплового баланса.

Уравнение теплового баланса при условии отсутствия тепловых потерь и фазовых переходов определяется следующей зависимостью:

$$Q = V_1 \rho_1 c_{p1} (t'_1 - t''_1) = V_2 \rho_2 c_{p2} (t''_2 - t'_2) \quad \text{или} \quad (t'_1 - t''_1) / (t''_2 - t'_2) = W_2 / W_1,$$

где $W_i = V_i \rho_i c_{pi}$ – условный эквивалент.

В тепловых аппаратах пищевых производств наиболее часто встречаются следующие случаи теплоотдачи:

1. Конвективный теплообмен в однофазной среде:

- теплоотдача при свободном движении жидкости;
- теплоотдача при вынужденном движении жидкости внутри труб;
- теплоотдача при вынужденном поперечном омывании пучка труб.

2. Теплообмен при фазовых превращениях:

- теплоотдача при конденсации паров на вертикальных поверхностях;
- теплоотдача при конденсации паров снаружи горизонтальных труб.

Для конвективного теплообмена без изменения агрегатного состояния вещества определяющими критериями являются критерий Рейнольдса Грасгофа и Прандтля, поэтому критерий Нуссельта выражается, как $Nu = f(Re, Gr, Pr)$, в котором критерий Рейнольдса учитывает режим вынужденного движения среды, критерий Грасгофа – режим свободной конвекции, критерий Прандтля – физические свойства рабочего тела.

При ламинарном режиме течения коэффициент теплоотдачи изменяется по длине трубы. В этом случае уравнение подобия $Nu = f(Re, Gr, Pr, l/d)$.

При турбулентном течении однофазной среды внутри гладкой трубы $Nu = 0,021Re^{0,8} Pr^{0,43}$, $Re > 10000$, $Pr = 0,7...2500$.

Теплообменники – это аппараты, в которых осуществляется теплообмен между рабочими средами. К ним относятся подогреватели, выпарные аппараты, конденсаторы, пастеризационные установки, испарители и др.

Различают собственно теплообменники, в которых передача тепла является основным процессом, и реакторы, в которых тепловой процесс является вспомогательным.

Теплообменники классифицируются:

- по способу передачи тепла (теплообменники смешения, в которых рабочая среда перемешивается; поверхностные, называемые рекуператорами, в которых тепло передается через поверхность нагрева);
- по назначению (подогреватели, испарители, холодильники и пр.);
- по виду рабочих сред (жидкостно-жидкостные, парожидкостные, газожидкостные и др.);
- по тепловому режиму (теплообменники периодического и непрерывного действия).

В качестве теплоносителя наиболее широко используется насыщенный или подогретый водяной пар. В смесительных аппаратах пар обычно барботируют в жидкость, т.е. впускают под уровень жидкости. При этом

конденсат смешивается с продуктом. В поверхностных аппаратах пар конденсируется на поверхности нагрева, и конденсат удаляется через водоотводной патрубков.

Водяной пар, как теплоноситель, обладает рядом положительных качеств: он легко транспортируется по трубам, обладает высокой теплоотдачей и позволяет регулировать температуру нагрева.

Обогрев горячей водой выгоден при вторичном использовании тепла конденсатов и жидких продуктов.

Недостатком пара и водяного обогрева является быстрый рост давления при повышении температуры. В условиях пищевых производств рабочие температуры в большинстве случаев находятся в диапазоне $150...160^{\circ}\text{C}$, что соответствует давлению $5...7 \cdot 10^5$ Па.

К наиболее известным видам теплообменных аппаратов относятся теплообменники с рубашками и кожухотрубные теплообменники.

Теплообменники с рубашками имеют цилиндрические, сферические или плоские двойные стенки (рубашки) через которые осуществляется теплообмен. Эти аппараты используются для периодического нагревания или охлаждения. Примерами такого теплообменника служат мешалки. Данные теплообменники характеризуются небольшими коэффициентами теплопередачи из-за малой скорости движения теплоносителя в водяной рубашке и небольшими значениями коэффициента теплоотдачи. Эти аппараты используются для периодического нагревания или охлаждения.

Кожухотрубные теплообменники представляют собой пучок трубок, установленных в цилиндрическом кожухе. Трубки вальцованы в трубные решетки и ограничивают межтрубное пространство. К трубным решеткам крепятся распределительные коробки с патрубками для впуска жидкости, протекающей внутри трубок. Трубки изготавливаются из меди, латуни или стали диаметром от 10 мм и выше. Кожух теплообменника обычно стальной.

В соответствии с действующим стандартом кожухотрубные теплообменники изготавливают следующих типов:

ТН – с неподвижными трубными решетками и жестким кожухом;

ТК – с неподвижными трубными решетками и температурным компенсатором;

ТУ – с неподвижными трубными решетками и U-образными трубами;

ТП – теплообменники с плавающей головкой;

ТС – теплообменники с сальником в плавающей головке.

Движение теплоносителя в теплообменниках может происходить за один проход или иметь несколько оборотов, поэтому по данному показателю теплообменники подразделяют на одно – и многоходовые.

Основным недостатком одноходовых теплообменников является несоответствие между пропускной способностью пучка трубок и площадью поверхности теплообмена. Так, например, трубка диаметром 22 мм при скорости жидкости 1 м/с может пропустить 1000 л/ч, площадь ее поверхности при длине 3500 мм составляет около 0,2 м², что недостаточно для существенного подогрева жидкости.

Характерная схема одноходового многотрубного кожухового теплообменника приведена на рис. 4.7.

На рис. 4.8 приведено устройство аналогичных по конструкции двухходовых теплообменников типов ТН и ТК. Теплообменники имеют сварной цилиндрический кожух 4, пучок трубок 5, распределительную камеру 2 и две крышки 1. Трубная решетка 9 приварена к корпусу. Перегородка 3 служит для образования двух ходов по трубам, а перегородки 8, зафиксированные стержнем 7 – для обеспечения зигзагообразного движения теплоносителя в межтрубном пространстве, за счет чего увеличивается скорость движения теплоносителя и, как результат, коэффициент теплопередачи.

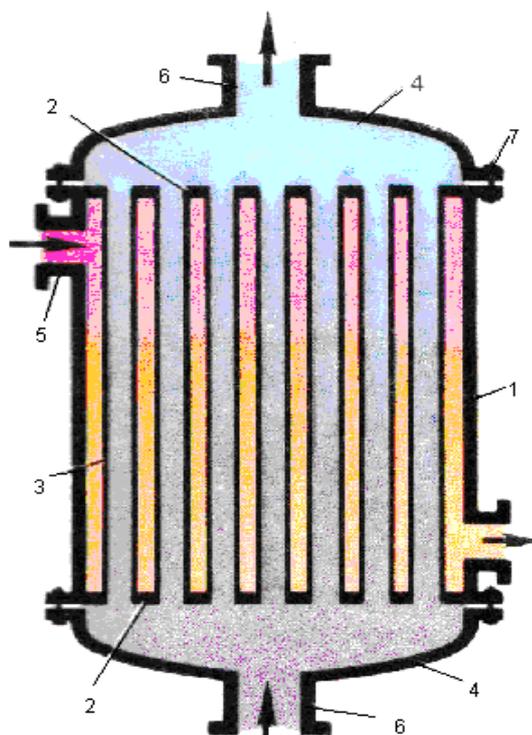


Рис. 4.7. Схема одноходового вертикального кожухотрубного теплообменника:
1 – кожух; 2 – трубные решетки; 3 – трубы; 4 – крышки; 5,6 – штуцеры для ввода и вывода теплоносителей; 7 – болтовое соединение

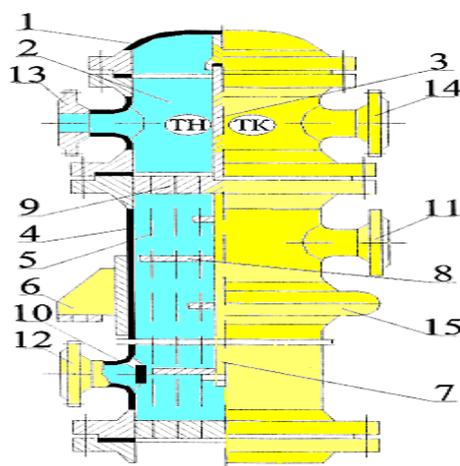


Рис. 4.8. Устройство двухходового кожухотрубного теплообменника:
1 – крышка; 2 – камера; 3, 8 – перегородки; 4 – кожух; 5 – трубный пучок; 6 – опора; 7 – стержень; 9 – трубная решетка; 10 – обтекатель; 11, 12, 13, 14 – фланцы; 15 – компенсатор

Обтекатель 10 служит защитой трубок от эрозии.

На рис. 4.9 приведены типовые схемы размещения труб в трубных решетках.

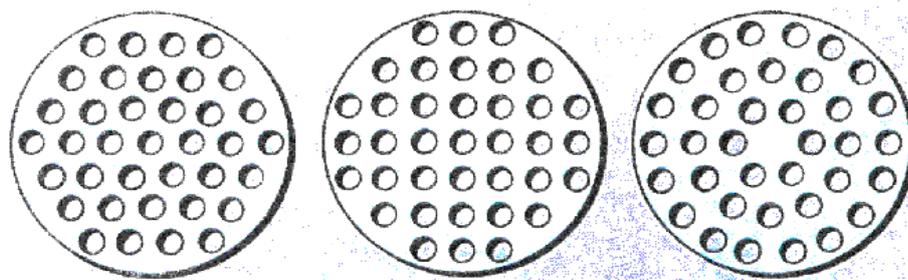


Рис. 4.9. Схемы размещения труб в трубных решетках

На рис. 4.10 указаны возможные способы крепления труб в трубных решетках.

Недостатком жесткого крепления трубных решеток к кожуху и самих трубок к решеткам являются температурные напряжения в металле, возникающие вследствие разности температур в местах крепления. Это приводит к различным удлинениям трубок и кожуха. Для частичной компенсации в конструкции двухходового теплообменника предусмотрен тороидальный компенсатор, сваренный из двух полуколец.

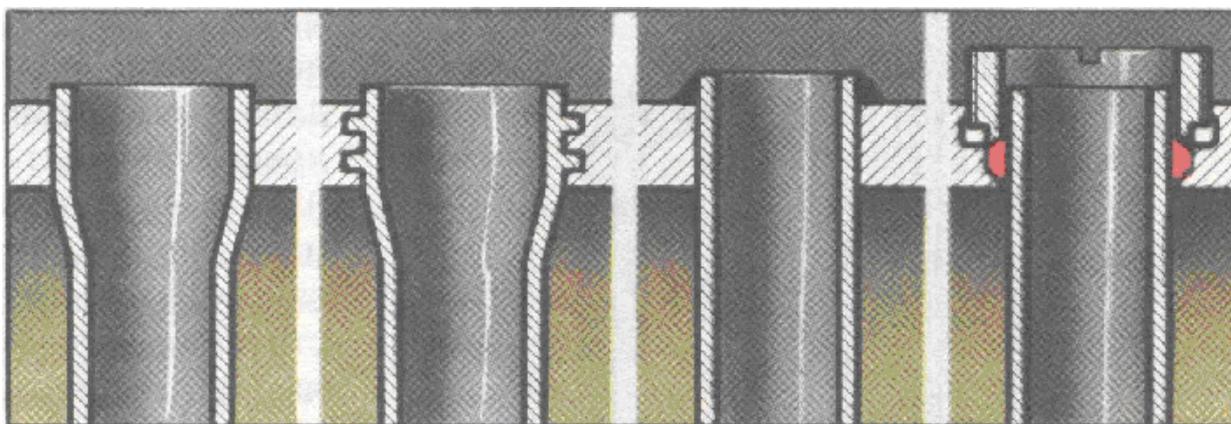


Рис. 4.10. Способы крепления труб в трубных решетках

При разности температур кожуха и труб более $50...60^{\circ}\text{C}$ целесообразно использовать полужесткие конструкции типа ТК или конструкции с полной компенсацией температурных напряжений - типа ТУ или ТП.

На рис. 4.11 приведена схема двухходового горизонтального кожухотрубного теплообменника с полной компенсацией температурных напряжений типа ТП и ТУ.

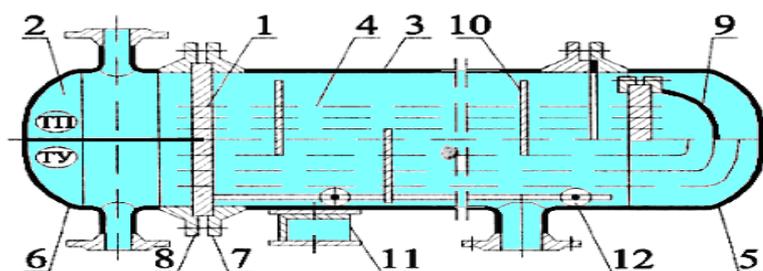


Рис. 4.11. Схема двухходового горизонтального кожухотрубного теплообменника:
 1 – решетка трубная; 2 – камера распределительная; 3 – корпус; 4 – пучок трубный;
 5 – днище; 6 – крышка; 7, 8 – фланцы, 9 головка плавающая; 10 – перегородки; 11 –
 опора; 12 – платформа роликовая

Теплообменник состоит из кожуха 3, пучка труб 4, камеры 2, правой и левой крышек 5 и 6. Левая трубная решетка жестко зажата между фланцами 7 и 8. Правая трубная решетка установлена свободно и вместе с крышкой 9 образует так называемую «плавающую головку».

Для турбулизации потока на трубках 4 закреплены ходовые перегородки 10. Опорная роликовая платформа 12 служит для облегчения сборки пучка труб в теплообменниках типа ТП диаметром более 800 мм.

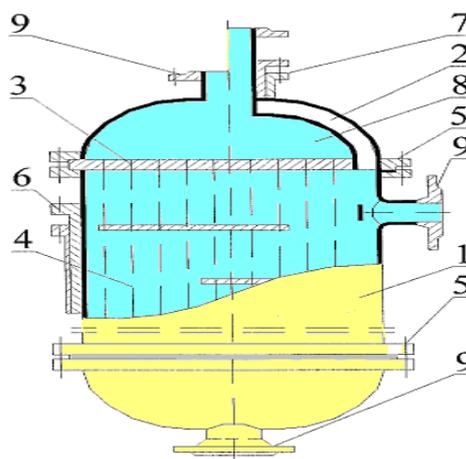


Рис. 4.12. Схема кожухотрубного теплообменника типа ТС:
 1 – корпус; 2 – крышка; 3 – трубная плита; 4 – пучок труб; 5, 9 – фланец;
 6 – нажимной фланец; 7 – сальниковая набивка; 8 – плавающая головка

Компенсация температурных напряжений может достигаться также путем применения сальникового устройства, которое может располагаться как в корпусе, так и на патрубке (рис. 4.12). Такие аппараты используются при

небольших давлениях до 0,6 МПа.

Улучшение конструкции может быть достигнуто группированием труб в отдельные пучки, для чего в распределительных коробках делаются перегородки (многоходовые теплообменники), в результате чего рабочая жидкость проходит через трубное пространство в большее, чем два, число ходов, перетекая через все пучки труб.

Кроме этих видов в пищевых производствах могут использоваться погружные трубчатые теплообменники, выполненные в виде змеевика, погружаемого в сосуд с жидкостью, а также теплообменники с плоскими поверхностями нагрева – ребристые, пластинчатые, теплообменники «труба в трубе» (рис. 4.13) и др.

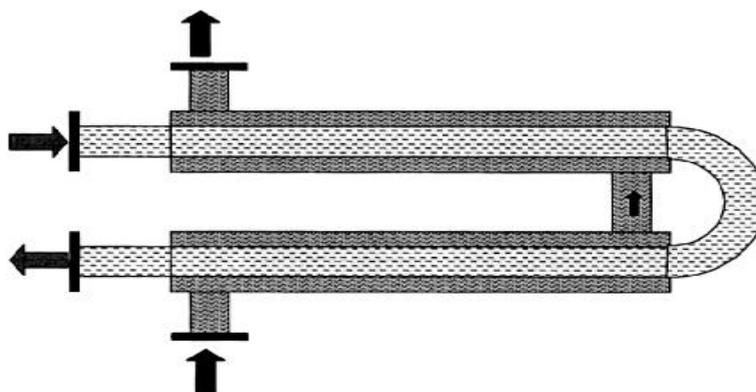


Рис. 4.13. Схема теплообменника типа «труба в трубе»

Для охлаждения и конденсации жидких и парогазовых сред не плохие показатели назначения имеют аппараты воздушного охлаждения. Эти аппараты обеспечивают в зависимости от материала труб и конструктивного исполнения (оребрение и пр.) рабочий диапазон температур от 40 до 400 °С при давлении 0,6... 6,4 МПа.

На рис. 4.14. приведена схема теплообменного аппарата воздушного охлаждения. На раме 1 аппарата установлены теплообменные секции 2, содержащие пучок поперечно оребренных труб. Внизу рамы закреплен диффузор 3 и коллектор 4, в центре которого установлен вентилятор 5. Для повышения степени охлаждения в конструкции аппарата предусмотрены

распылительные водяные форсунки 9.

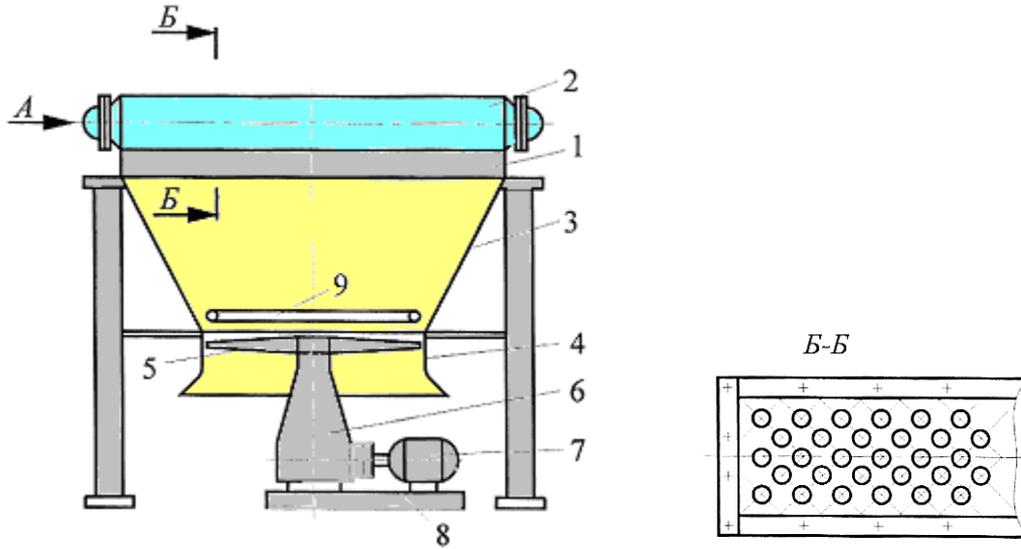


Рис. 4.14. Схема аппарата воздушного охлаждения:
1 – рама; 2 – теплообменные секции; 3 – диффузор; 4 – коллектор;
5 – вентилятор; 6 – редуктор; 7 – двигатель; 8 – плита; 9 – форсунки

В тепловом аппарате температуры горячего и холодного теплоносителей изменяются обратно пропорционально их условным эквивалентам, и на изменение температур большое влияние оказывает направление движения теплоносителей.

Пример. Пусть в теплообменном аппарате охлаждается в течение часа $0,5 \text{ м}^3$ горячего теплоносителя плотностью $\rho_1 = 1100 \text{ кг/м}^3$, начальной температурой 90°C и теплоемкостью $c_{p1} = 3046 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{град)}$. Расход холодной воды при температуре 10°C составляет 1 м^3 . Поверхность аппарата составляет 2 м^2 , коэффициент теплопередачи $k = 40 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{град)}$.

Требуется определить конечные температуры теплоносителей и расход теплоты при прямотоке и противотоке.

Имеем для прямотока.

Численное значение условных эквивалентов:

$$W_1 = V_1 \rho_1 c_{p1} = \frac{0,5 \cdot 1100 \cdot 3046}{3600} = 465 \text{ Вт/град.}$$

$$W_2 = \frac{1 \cdot 1 \cdot 4190}{3600} = 1165 \text{ Вт/град.}$$

$$W_1/W_2 = 465/1165 = 0,39; \quad kF/W_1 = 40 \cdot 2/465 = 0,17.$$

Из справочной таблицы $\psi_{\text{ПРЯМ}}(0,39;0,17) = 0,2$.

Температура горячего теплоносителя на выходе при $t_1' - t_1'' = (90 - 10) \cdot 0,2 = 16^{\circ}\text{C}$ равна $t_1'' = 90 - 16 = 74^{\circ}\text{C}$

Расход теплоты $Q = W_1(t_1' - t_1'') = 465(90 - 74) = 7440\text{Вт}$.

Конечная температура холодного теплоносителя при $t_2'' - t_2' = Q/W_2 = 7440/1165 = 6,5^{\circ}\text{C}$ равна $t_2'' = 10 + 6,5 = 16,5^{\circ}\text{C}$.

Для противотока:

$\psi_{\text{ПРОТ}}(0,39;0,17) = 0,25$.

Температура горячего теплоносителя при выходе из аппарата при $t_1' - t_1'' = (90 - 10) \cdot 0,25 = 20^{\circ}\text{C}$ равна $t_1'' = 90 - 20 = 70^{\circ}\text{C}$

Расход теплоты $Q = W_1(t_1' - t_1'') = 465(90 - 70) = 9300\text{Вт}$.

Конечная температура холодного теплоносителя при $t_2'' - t_2' = Q/W_2 = 9300/1165 = 8^{\circ}\text{C}$ равна $t_2'' = 10 + 8 = 18^{\circ}\text{C}$.

Можно видеть, что использование в теплообменном аппарате противотока позволяет при одних и тех же условиях передать по сравнению с прямотоком большее количество теплоты, примерно на 20%.

Конструктивное исполнение и параметры теплообменника выбирается с учетом следующих требований:

- степень соответствия аппарата технологическому процессу обработки продукта (диапазон температур, регулирование и стабилизация температурного режима и т.д.);
- диапазон рабочих скоростей и время пребывания продукта в аппарате;
- соответствие материала аппарата обрабатываемому продукту;
- соответствие аппарата требуемым давлениям рабочей среды;
- требуемая пропускная способность и полезная отдача аппарата по интенсивности теплообмена;
- простота конструкции, удобство монтажа и обслуживания аппарата;
- соответствие аппарата показателям надежности.

Практикой эксплуатации теплообменных аппаратов установлено, что из

парожидкостных подогревателей наиболее рациональной конструкцией является многоходовой трубчатый теплообменник жесткой конструкции.

К способам повышения интенсивности теплообмена в подогревателях относятся:

- увеличение скорости движения рабочих сред, что достигается разбивкой пучка трубок на ходы и установкой межтрубных перегородок;
- создание условий для отвода конденсата при паровом обогреве;
- создание наилучших условий обтекания поверхности нагрева, чтобы вся поверхность участвовала в теплообмене;
- снижение термических сопротивлений.

Тепловой расчет теплообменных аппаратов проводят с целью:

- определения средней разности температур и средних температур рабочих сред;
- тепловой нагрузки и расхода рабочих сред;
- коэффициента теплопередачи;
- поверхности обогрева.

После этого определяют конструктивные параметры теплообменника.

Методика теплового расчета трубчатого теплообменника.

Рассмотрим методику теплового расчета на примере парожидкостного трубчатого подогревателя.

Исходные данные:

- количество подогреваемой жидкости G (кг/ч);
- начальная и конечная температура t_n, t_k ;
- давление греющего пара p ;
- тип подогревателя – вертикальный трубчатый многоходовой;
- диаметр стальных трубок d_B, d_H ;
- длина трубок l ;
- скорость движения жидкости ω , м/сек;
- коэффициент использования поверхности нагрева φ .

1. Определение температуры насыщения t_s по давлению насыщенного пара p .

Разности температур в начале и конце нагревания:

$$\Delta t_1 = t_s - t_n,$$

$$\Delta t_2 = t_s - t_k.$$

$$\text{Средняя разность температур } \Delta \bar{t} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{2,31 \lg \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}.$$

Средняя температура нагреваемой жидкости $\bar{t} = t_s - \Delta \bar{t}$.

2. При средней температуре \bar{t} и концентрации сухих веществ находят физико-механические параметры жидкости – вязкость μ или ν , плотность ρ , теплоемкость c , теплопроводность λ , температуропроводность a .

Число Прандтля: $Pr = \nu / a = \nu c \rho / \lambda$

3. Определяют тепловую нагрузку и расход пара.

Тепловая нагрузка с учетом потерь:

$$Q = x G c (t_k - t_n), \text{ Дж/сек,}$$

где $x = 1,02 \dots 1,05$ – коэффициент, учитывающий тепловые потери.

Расход пара:

$$D = Q / (i - \theta), \text{ кг/сек,}$$

где i, θ – энтальпия греющего пара и его конденсата (Дж/кг), $\theta \approx t_s - 2 \dots 3^\circ \text{C}$. Энтальпия определяется по таблицам в зависимости от p .

4. Расчет термического сопротивления и коэффициента теплопередачи.

Коэффициент теплоотдачи от конденсирующего пара к стенке:

$$\alpha_1 = \frac{A_1}{\sqrt[4]{l \Delta t_1}},$$

где A_1 функция физических параметров конденсата, выбираемая из справочных таблиц в зависимости от температуры конденсата;

$l = h$ – высота трубки;

Δt_1 – разность температур пара и стенки. При выполнении расчетов значением Δt_1 задаются.

Коэффициент теплоотдачи от стенки к жидкости:

$$\alpha_2 = B \frac{\omega^{0,8}}{d_B^{0,2}},$$

где B – функция физических параметров данной жидкости, зависящая от концентрации сухих веществ и температуры, выбирается по справочной таблице.

Термическое сопротивление стенки:

$$R_{CT} = \delta_{CT} / \lambda_{CT}.$$

Термическое сопротивление чистой поверхности нагрева:

$$R_0 = R_1 + R_2 + R_{CT} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta_{CT}}{\lambda_{CT}}.$$

Общее термическое сопротивление:

$$R = R_0 / \varphi.$$

5. Определение поверхности нагрева $F = Q / k\Delta\bar{t}$.

6. Определение конструктивных элементов теплообменника:

– площадь сечения трубок одного хода $f_1 = G / \rho\omega$;

– количество трубок одного хода $n_1 = f_1 / 0,785d_B^2$;

– расчетная длина трубок $L_1 = F / \pi d_p n_1$, где $d_p = 0,5(d_B + d_H)$ при $\alpha_1 \approx \alpha_2$;

$d_p = d_B$ при $\alpha_1 > \alpha_2$ и $d_p = d_H$ при $\alpha_1 < \alpha_2$;

– число ходов в трубном пространстве $z_1 = L_1 / l$;

– общее число трубок на трубной решетке $n = z_1 n_1$;

– откорректированная длина трубок $l = F / 4z_1 f_1$.

Трубки в теплообменнике могут размещаться по вершинам и сторонам правильных шестиугольников, по сторонам квадратов или по концентрическим окружностям. Преимущественно используется первый способ размещения трубок.

Внутренний диаметр корпуса аппарата:

$$D_0 = 0,635 \frac{t}{d_H} \sqrt{\frac{F d_H}{l \psi} \sin \alpha},$$

где $\psi = 0,6$ или $0,9$ – коэффициент заполнения трубной плиты для многоходовых или одноходовых теплообменников соответственно;

t – шаг размещения трубок;

$\alpha = 60^\circ$ – угол, образованный центральными линиями трубных рядов.

Диаметр патрубков:

$$D_n = 1,13 \sqrt{\frac{G}{\rho \omega}},$$

где $\omega = 20...40$ м/сек для пара;

$\omega = 0,5...1,5$ м/сек для жидкости – скорость движения среды.

Пластинчатые теплообменники относятся к одним из перспективных видов теплообменных аппаратов. Пластинчатый теплообменник содержит группу теплообменных пластин, сжатых в один пакет и герметизированных с помощью резиновых прокладок. Система прокладок после сборки пакета пластин обеспечивает два рабочих канала – один для горячей среды, другой – для холодной. Оба канала соединены в установке с помощью штуцеров для входа и выхода жидкости (рис.4.15).

Интенсивность теплоотдачи в пластинчатых теплообменниках зависит от формы, размеров и конструктивных особенностей пластин.

4.6. Процессы нагревания, охлаждения и конденсации. Конденсаторы

Процесс нагревания в пищевых технологиях применяют для ускорения массообменных процессов и химических реакций. Для нагревания используются различные теплоносители: водяной пар, топочные газы, воздух, электромагнитное излучение (СВЧ, ИК-нагрев, индуктивный нагрев).

Наиболее широко распространено нагревание сред насыщенным или перегретым водяным паром давлением до 1.2 МПа до температуры не более 190°C . Использование более высокого давления пара, при котором можно поднять температуру, экономически нецелесообразно, поскольку влечет за собой увеличение металлоемкости аппаратов и трубопроводной арматуры. В

процессе нагревания перегретый пар охлаждается, отдавая тепло, и конденсируется.

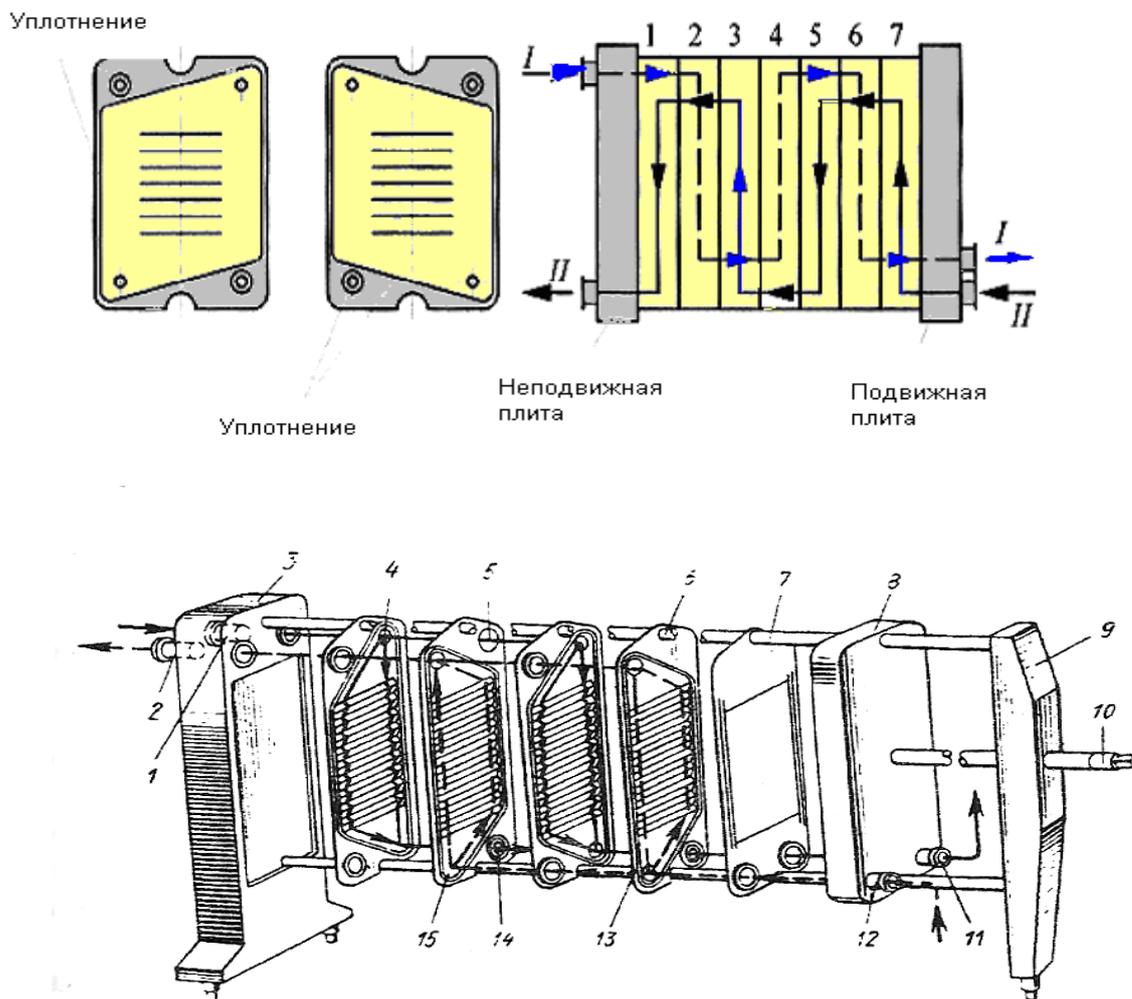


Рис. 4.15. Схема пластинчатого теплообменника:
 1,2,11,12 – штуцеры; 3, 9 – стойка; 4 – верхнее отверстие; 5 – кольцевая прокладка;
 6 – граничная пластина; 7 – штанга; 8 – нажимная плита; 10 – винт; 13 – прокладка;
 14 – нижнее отверстие; 15 – теплообменная пластина

Наиболее широко распространено нагревание сред насыщенным или перегретым водяным паром давлением до 1.2 МПа до температуры не более 190⁰С. Использование более высокого давления пара, при котором можно поднять температуру, экономически нецелесообразно, поскольку влечет за собой увеличение металлоемкости аппаратов и трубопроводной арматуры. В процессе нагревания перегретый пар охлаждается, отдавая тепло, и конденсируется.

Конденсация – это процесс сжижения пара. Этот процесс используется в

пищевых производствах для создания разрежения в выпарных аппаратах, для использования теплоты конденсации при нагреве жидкости в теплообменниках с паровым обогревом, в холодильных, сушильных и других установках.

Нагревание паром имеет следующие преимущества перед другими способами нагрева:

- высокая удельная теплота парообразования насыщенного водяного пара (1990...2260 кДж/кг);
- высокий коэффициент теплоотдачи от конденсирующегося пара (5000...18000 Вт/(К·м²);
- равномерность обогрева поверхности.

Различают два способа нагрева нагревания – острым и глухим паром. При нагревании острым паром пар вводится непосредственно в нагреваемую жидкость (барботируется), в которой конденсируется с отдачей тепла. Конденсат при этом смешивается с жидкостью. При этом происходит разбавление жидкости конденсатом. Данный способ находит применение для нагревания воды и водных растворов.

Нагревание глухим паром осуществляется без разбавления нагреваемой жидкости образующимся конденсатом, т.е. в этом случае нагрев происходит через стенку, например, в аппаратах с рубашками, змеевиками и пр. Для отвода конденсата в таких конструкциях предусматривают специальные устройства, называемые конденсатоотводчиками.

Нагревание топочными газами позволяет обеспечить температуру нагрева среды от 180 до 1000⁰С. Топочные газы образуются при сгорании твердого, жидкого или газообразного топлива в топках или печах пищевых производств. К недостаткам данного способа нагрева относят небольшой коэффициент теплоотдачи от топочного газа к стенкам аппарата, трудность регулирования температуры, пожароопасность. Устранение данных недостатков в какой-то степени может быть устранено использованием промежуточных теплоносителей, которые предварительно нагреваются топочными газами, а затем отдают запасенное тепло обрабатываемой среде.

Нагревание с использованием электромагнитного поля позволяет обеспечить широкий диапазон температур и обладает большей универсальностью и экономичностью по сравнению с другими видами теплоносителей.

Процессы охлаждения широко используются в пищевых технологиях. В качестве хладагентов используются воздух, вода, аммиак, озонобезопасные фреоны. Основным элементом холодильных установок являются компрессоры для сжатия воздуха или другого газа, которые подразделяют в зависимости от конструкции рабочих органов на центробежные (турбокомпрессоры), поршневые, мембранные, ротационные и винтовые. В пищевых производствах наибольшее распространение получили поршневые компрессоры.

Принципиальная схема компрессорного холодильного аппарата приведена на рис. 4.16.

Рис.4.16. Схема работы компрессорного холодильного аппарата:

1 – камера; 2 – холодильная машина; 3 – окружающая среда

От охлаждаемого продукта, находящегося в камере с температурой T_0 , холодильный агент отнимает тепло q_0 и переносит его для теплообмена с окружающей средой, имеющей более высокую температуру T . Обратный процесс холодильного цикла требует совершения работы холодильной машиной. Теплота эквивалентная работе A воспринимается хладагентом и вместе с теплотой q_0 передается окружающей среде, $q = q_0 + A$, (кДж/кг).

Эффективность холодильного аппарата характеризуется холодильным коэффициентом $E = T_0 / (T - T_0)$, где T_0 – температура охлаждаемого продукта, T – температура охлаждающей среды.

На рис. 4.17 в качестве примера приведена схема непосредственного охлаждения холодильной камеры хладагентом. Положительным моментом данного способа охлаждения продуктов является небольшой расход энергии при достаточно большом значении холодильного коэффициента E и

незначительная занимаемая площадь под холодильный агрегат. Недостатком данного способа является возможная порча продуктов в случае утечки хладагента.

Рис. 4.17. Схема непосредственного охлаждения камеры:

1 – компрессор; 2 – конденсатор; 3 – вентиль; 4 – испаритель

На рис. 4.18 приведена схема компрессорно-конденсаторного агрегата холодильной машины модели МХВ5-1-2 с воздушным конденсатором.

Рис. 4.18. Схема компрессорно-конденсаторного агрегата:

1 – компрессор; 2 – конденсатор; 3 – вентилятор; 4 – ресивер;

5 - отделитель жидкости; 6, 7 – датчики давления

В табл. 4.1 приведены данные потребления холода для обработки одной тонны продукта

Таблица 4.1

Потребление холода для обработки продуктов

Вид продукта	Температура, °С			Потребление холода, кВт
	Начальная	Конечная	Хранения	
Мясо (туши)	+35	-18		10
Мясо разделанное	+35	-18		38
Птица	+20	-18		28
Рыба	+15	-25		35
Овощи и фрукты	+25	-18		23
Хранение продуктов				
Мясо, птица, рыба			-18	0,12...0,2
Овощи и фрукты			0...-5	0,16...0,2

Процесс конденсации. При конденсации паров на поверхности нагрева образуются отдельные капли или сплошная пленка конденсата. В зависимости от геометрических и режимных условий пленка конденсата стекает в разных гидродинамических режимах: ламинарном, переходном, турбулентном или

смешанном. Эта пленка является основным препятствием для теплового потока, поэтому интенсивность теплоотдачи зависит от толщины и режима течения пленки.

Основные закономерности теплоотдачи при конденсации пара и ламинарном течении пленки определяются выражением:

$$Nu = C(\text{Pr} \cdot Gr \cdot Ku)^{0,25},$$

где $C = 0,943$ – для вертикальной поверхности;

$C = 0,728$ – для горизонтальных труб;

Ku – критерий фазового превращения Кутателидзе, $Ku = \frac{r_k}{C\Delta t_1}$.

Различают поверхностные конденсаторы и конденсаторы смешения. Первые используют, когда надо сохранить конденсат в чистом виде. Поверхностные конденсаторы представляют собой трубчатый теплообменник, хладоносителем в котором является вода или воздух.

К конденсаторам смешения относятся прямоточные или противоточные конденсаторы. В этих конденсаторах паровой поток соприкасается с холодной водой, в результате чего получается смесь воды и конденсата.

Принцип действия вертикального кожухотрубного конденсатора, применяемого в молочных производствах, заключается в следующем. Вторичный пар из вакуум-аппарата поступает через патрубок в межтрубное пространство конденсатора, где конденсируется. Конденсат покрывает трубки в виде пленки и стекает вниз, откуда откачивается насосом. Охлаждаемая вода движется внутри многоходового трубного пучка.

Степень переохлаждения конденсата $T_k - T_2$ зависит от температуры стенки, расположения поверхности нагрева, количества пара и других факторов.

Тепловая нагрузка для зоны конденсации: $Q_{\text{конд}} = Wc(t_2 - t_a)$,

тепловая нагрузка зоны охлаждения $Q_{\text{охл}} = Wc(t_a - t_1)$,

где W – количество охлаждаемой воды, кг/с;

c – удельная теплоемкость воды;

t_1, t_2, t_a – начальная, конечная температура охлаждаемой воды и температура охлаждаемой воды на границе зон конденсации и охлаждения соответственно.

Конденсаторы смешения используются для создания разрежения в установках, работающих под вакуумом (вакуум-аппараты, выпарные установки и др.).

На рис. 4.19 приведена схема барометрического конденсатора смешения с противоточным движением воды и пара. Холодная вода через питатель подается на верхнюю полку и каскадами стекает с одной полки на другую. Пар подается на нижнюю полку и движется вверх, конденсируясь между полками. Воздух отсасывается через ловушку водяных паров. Сливная барометрическая труба служит гидрозатвором и обеспечивает слив воды вместе с конденсатом без применения насоса.

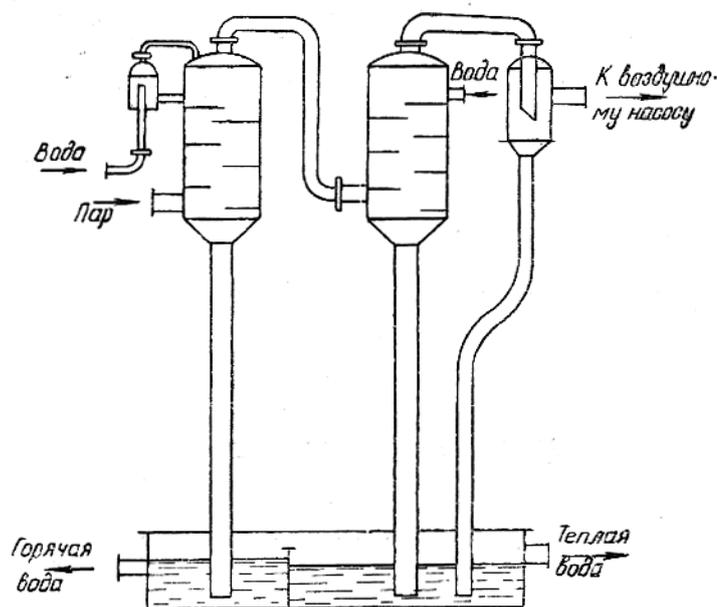


Рис. 4.19. Схема двухступенчатого барометрического конденсатора

В смешивающем конденсаторе с параллельным течением воды и пара охлаждающая вода от насоса под давлением впрыскивается через сопла в паровой поток (рис. 4.20).

Тепловой баланс конденсатора имеет вид:

$$D(i - ct_2) = Wc_B(t_2 - t_1),$$

где D – массовый расход пара;

i – энтальпия пара;

c, c_B – удельная теплоемкость конденсата и охлаждаемой воды соответственно;

t_1, t_2 – температура охлаждаемой и барометрической воды соответственно.

Удельный расход охлаждаемой воды

$$m = W / D.$$

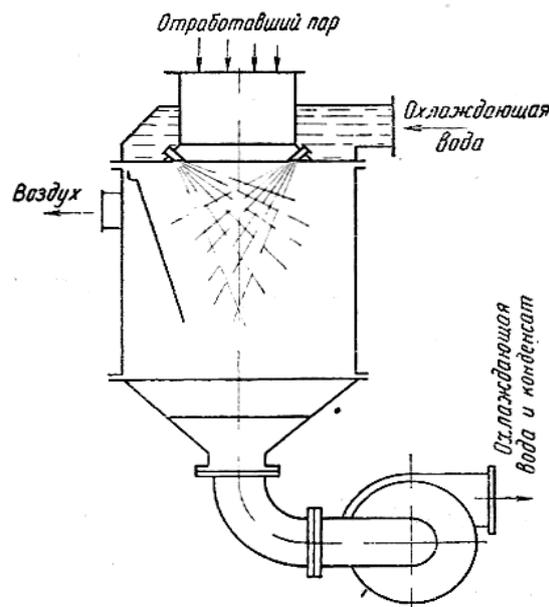


Рис. 4.20. Конденсатор смешения с параллельным течением охлаждающей воды и пара

Условные обозначения

t, θ – температура.

$grad t$ – градиент температуры.

Q – количество теплоты.

q – плотность теплового потока.

- λ – коэффициент теплопроводности.
- c – удельная теплоемкость.
- a – коэффициент температуропроводности.
- α – коэффициент теплоотдачи.
- k – коэффициент теплопередачи.
- R – общее термическое сопротивление.
- ρ – плотность материала.
- ν – кинематический коэффициент вязкости.
- μ – коэффициент динамической вязкости.
- Ω – характер движения жидкости.
- Re – число Рейнольдса.
- ∇ – оператор Гамильтона.
- ∇^2 – оператор Лапласа.
- Δt – температурный напор.
- δ – толщина стенки.
- F – площадь поверхности.
- Φ, L – форма и размер поверхности.
- $d_{эКВ}$ – эквивалентный диаметр.
- Gr – число Грасгофа.
- Pr – число Прандтля.
- Nu – число Нуссельта.
- A – поглотительная способность тела.

Глоссарий

Конвекционный нагрев – нагрев тела при омывании его теплоносителем, имеющим температуру отличную от температуры тела.

Кондуктивный нагрев – нагрев тела непосредственно от нагретой поверхности, когда тепло передается теплопроводностью от этой поверхности.

Конвективный теплообмен – одновременный перенос теплоты конвекцией и теплопроводностью.

Нестационарное тепловое поле – тепловое поле, температура в котором является функцией координат и времени.

Изотермная поверхность – поверхность равных температур.

Градиент температуры – вектор, направленный по нормали к изотермной поверхности в сторону увеличения температуры, численно равен производной температуры по этому направлению.

Тепловой поток – количество теплоты, проходящее в единицу времени через производную поверхность.

Плотность теплового потока или вектор плотности теплового потока – количество теплоты, проходящее через единицу изотермной поверхности в единицу времени. Вектор плотности направлен по нормали к изотермной поверхности в сторону убывания температуры.

Коэффициент теплопередачи – величина, выражающая количество теплоты, проходящее через единицу поверхности в единицу времени от горячего теплоносителя к холодному при изменении температуры между ними на 1°C .

Общее термическое сопротивление – величина, обратная коэффициенту теплопередачи.

Ламинарный поток среды – поток, в котором все частицы среды движутся по параллельным траекториям и их движение длительное время совпадает с направлением всего потока

Турбулентный поток – поток, в котором постоянно происходит перемешивание слоев, и каждая частица, перемещаясь вдоль потока, совершает различные движения относительно стенок канала.

Число Рейнольдса – безразмерная величина, связывающая среднюю скорость движения среды, эквивалентный диаметр канала и кинематический коэффициент вязкости.

Число Прандтля – безразмерная величина, характеризующая соотношение толщин динамического и теплового пограничных слоев.

Вязкостный режим – режим не изотермного движения жидкости при

ламинарном течении, соответствующий течению вязких жидкостей при отсутствии естественной конвекции.

Вязкостно-гравитационный режим – режим, при котором вынужденное течение жидкости сопровождается естественной конвекцией.

Поглотительная способность тела – величина, представляющая отношение поглощенной энергии излучения к общему количеству энергии.

Контрольные вопросы

1. Какие существуют способы нагрева тел?
2. Что понимается под конвективным теплообменом?
3. Что понимается под тепловым потоком и его плотностью?
4. Каков характер распределения температур в материале при конвективном и кондуктивном способах подвода тепла?
5. От каких факторов зависит подвод тепла к телу при кондуктивном и конвективном способах подвода?
6. В чем состоят преимущества радиационного нагрева?
7. Каким образом осуществляется процесс передачи тепла излучением?
8. Что понимается под изотермной поверхностью?
9. Что понимается под градиентом температуры и каково его численное выражение?
10. Какой аналитической зависимостью выражается связь между количеством теплоты и градиентом температуры при кондуктивном способе нагрева?
11. Каков физический смысл коэффициента теплопроводности?
12. Что собой представляет уравнение для трехмерного нестационарного теплового поля при отсутствии внутренних источников теплоты?
13. Какова сущность процесса теплопередачи через плоскую стенку и чему равна при этом плотность теплового потока и общее количество передаваемой теплоты?
14. Каковы особенности теплопередачи через однослойную

цилиндрическую стенку?

15. Каковы особенности теплопередачи через многослойную цилиндрическую стенку?

16. Что понимается под коэффициентом теплопередачи и общим термическим сопротивлением?

17. От чего зависит величина критического диаметра слоя изоляции трубопровода, и какое условие должно соблюдаться для эффективной работы изоляции?

18. С какой целью используются в тепловых аппаратах ребристые стенки?

19. Чему равен коэффициент эффективности ребер?

20. Каким образом осуществляется перенос теплоты при конвекции, и какие виды движений среды при этом могут иметь место?

21. Каким критерием характеризуется характер движения среды в канале произвольного сечения, и на какие процессы теплообмена он влияет?

22. Какие вещества могут использоваться в качестве теплоносителей, и какими основными параметрами они характеризуются с позиций теплообмена?

23. Каким законом определяется процесс переноса теплоты на границе с поверхностью тела?

24. Какой системой дифференциальных уравнений описывается конвективный теплообмен?

25. Какие режимы не изотермного движения вязких жидкостей могут наблюдаться при ламинарном течении, и как при этом происходит передача теплоты?

26. Какие явления теплообмена характерны для турбулентного движения жидкостей в трубах?

27. Какова картина теплообмена при поперечном омывании пучка труб?

28. Чему равно общее количество энергии излучения, приходящейся на тело?

29. Какие виды теплообмена наиболее часто встречаются в аппаратах пищевых производств?

30. Что представляет собой теплообменник, и какие аппараты пищевых производств относятся к теплообменникам?
31. По каким признакам классифицируются теплообменные аппараты?
32. Что представляет собой кожухотрубный теплообменник?
33. Что называется процессом конденсации?
34. На какие виды делятся промышленные конденсаторы, каково их устройство и принцип работы?
35. Какие параметры определяют при работе конденсаторов?

Лекция 5. Массообменные процессы

Вопросы:

- 5.1. Основные понятия теории массопередачи.
- 5.2. Процессы адсорбции и абсорбции.
- 5.3. Диффузионные аппараты.

5.1. Основные понятия теории массопередачи

Процессы переноса массы вещества или диффузионные процессы при трансформации сырья в готовую продукцию широко распространены в пищевых технологиях. Практически всегда эти процессы происходят в тепловом поле. В зависимости от интенсивности этого поля можно условно говорить о *процессах массопередачи*, когда температура оказывает не столь существенное влияние на ход технологического процесса и практически в ходе его остается постоянной или меняется незначительно, и о *процессах тепломассопередачи*, когда процесс значительно ускоряется под действием температуры

В процессе обработки пищевые среды, многие из которых являются коллоидными капиллярно-пористыми телами, часто подвергаются увлажнению при нагревании или охлаждении. При этом происходит не только передача тепловой энергии, но и перемещение вещества, т.е. *массоперенос* или *диффузия*.

Диффузия – это самопроизвольный процесс проникновения одного вещества в другое до момента наступления равновесного распределения концентраций этих веществ. Диффузия может быть молекулярной, возникающей за счет теплового движения молекул; и молярной, когда перенос вещества осуществляется за счет перемешивания отдельных частей.

Переход веществ из одной фазы в другую под влиянием молекулярной или молярной диффузии называется *массообменным процессом* или *массообменом*. К массообменным процессам относятся:

- абсорбция и адсорбция газов и паров;
- десорбция газов;
- экстракция жидких и твердых веществ;
- перегонка жидкостей;
- кристаллизация и растворение;
- сушка влажных материалов и др.

Абсорбция – это поглощение вещества из раствора или смеси газов всем объемом поглотителя – твердым телом или жидкостью.

Адсорбция – это поглощение вещества на поверхности раздела фаз.

Экстракция – это извлечение жидкостью из твердого или жидкого вещества одного или нескольких компонентов (например, сахара водой или жира растворителями и пр.).

Сушка – это процесс удаления влаги из материалов под действием температуры.

Кристаллизация – это процесс зарождения и роста кристаллов при переходе вещества из газообразного или жидкого состояния в кристаллическое.

Ректификация – это процесс разделения многокомпонентных жидких смесей путем непрерывного обмена между жидкой и газообразной фазами, находящимися в противотоке.

Во всех этих процессах, независимо от того, в каких фазах происходит массообмен, вещества которыми обмениваются фазы, должны переместиться к поверхности раздела фаз, пройти эту поверхность раздела и проникнуть в

другую фазу.

Диффузия называется концентрационной, наблюдаемой в смесях с различной концентрацией компонентов, когда каждый компонент движется в направлении меньшей концентрации до момента ее выравнивания. Концентрация в любой точке рассматриваемого пространства является функцией координат и времени, $C = f(x, y, z, \tau)$, и определяет поле концентраций

Практическим примером массообменного процесса является извлечение сахара из свекловичной стружки, которое осуществляется диффузионным способом.

Движущей силой процесса является разность концентраций. Для диффузии сахара из стружки в воду или диффузионный сок в аппарате должна поддерживаться разность между концентрациями сахара в стружке и диффузионном соке, что достигается при их встречном движении.

Основной закон молекулярной диффузии (закон Фика) устанавливает связь между количеством экстрагируемого вещества и основными параметрами процесса в массе частиц:

$$dS = -D \frac{dC}{dx} dF d\tau,$$

где dS – количество вещества, продиффузировавшего через единичную площадь dF за единицу времени $d\tau$;

D – коэффициент диффузии; dC/dx – градиент концентрации вещества.

Коэффициент диффузии является физическим параметром материала и численно равен массе вещества, диффундирующего через единицу площади за единицу времени при градиенте концентрации равном 1. Он зависит от температуры, вязкости растворителя, размера частиц вещества.

При использовании закона Фика принимается допущение, что стружка однородна по толщине и массовая доля сахара внутри стружки меняется линейно.

Массоотдача. Перенос вещества из глубины фазы к поверхности раздела

сред или от поверхности раздела в глубину другой фазы называется массоотдачей. В движущейся жидкости наряду с молекулярной диффузией имеет место перемещение молярных, т.е. состоящих из большого числа молекул, частей среды. Этот вид переноса называется конвективной диффузией. Конвективная диффузия зависит от градиента концентраций, физико-механических свойств среды и параметров ее движения.

Процесс массоотдачи описывается следующим уравнением:

$$G = \beta(C_n - C_k)F\tau,$$

где β – коэффициент массоотдачи, м/сек;

C_n, C_k – концентрация на границе раздела фаз и в ядре потока.

Массопередача. Для процесса массопередачи при стационарных условиях используется следующее уравнение:

$$dG = k(C_{k2} - C_{k1})dFd\tau,$$

где k – коэффициент массопередачи;

$(C_{k2} - C_{k1})$ – разность концентраций в ядрах потоков первой и второй фаз.

На границе твердое тело-жидкость количество вещества перенесенного со стороны твердого тела в соответствии с законом Фика $dG = -D \frac{\partial C}{\partial x} dFd\tau$.

Количество вещества, переносимое от поверхности раздела сред в жидкую фазу $dG = \beta(C_n - C_k)dFd\tau$. Отсюда следует выражение, которое описывает массообмен на границе твердое тело – жидкость, $\beta(C_n - C_k) = -D \frac{\partial C}{\partial x}$.

Термодиффузия. К термодиффузии относится молекулярная диффузия, вызванная неоднородным распределением температуры в смеси.

При изотермных условиях интенсивность концентрационной диффузии характеризуется плотностью потока массы вещества.

Плотность диффузионного потока вещества, т.е. количество вещества, диффундирующего в единицу времени через единичную площадку концентрационной поверхности прямо пропорционально градиенту концентраций.

Плотность диффузионного потока при наличии всех видов диффузий определяется уравнением:

$$G = -D \left(\frac{\partial p_i}{\partial n} + \rho \frac{k_T}{T} \frac{\partial T}{\partial n} + \frac{\rho_1 \rho_2}{\rho} \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial n} \right),$$

где $-D \frac{\partial p_i}{\partial n}$ – плотность потока массы, учитывающая концентрационную диффузию;

ρ_i – плотность (концентрация) i -го ($i = 1; 2$) компонента;

D – коэффициент взаимной молекулярной диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$;

$\partial \rho_i / \partial n$ – градиент концентрации, направленный в сторону ее увеличения;

n – направление нормали к поверхности одинаковой концентрации вещества;

$-D \rho \frac{k_T}{T} \frac{\partial T}{\partial n}$ – плотность потока массы, учитывающая термодиффузию;

ρ – плотность смеси;

ρ_1, ρ_2 – плотности компонентов;

$k_T = D_T / D$ – термодиффузионное отношение;

D_T – коэффициент термодиффузии;

$\frac{\partial T}{\partial n}$ – температурный градиент;

μ_1, μ_2 – молекулярные массы компонентов;

$\frac{\partial p}{\partial n}$ – градиент полного давления.

Знак минус в уравнении указывает, что перенос вещества происходит в сторону меньшей концентрации.

В движущейся среде вещество переносится не только путем молекулярной диффузии, но и конвекцией. При перемещении объема смеси плотностью ρ со скоростью ω осуществляется конвективный перенос массы смеси $G_k = \rho \omega = \sum \rho_i \omega$.

Суммарная плотность потока массы и ее составляющие являются векторными величинами.

Коэффициент температуропроводности равен:

$$a = \lambda / c_B \rho_0,$$

где $c_B = c_0 + c_{ж}$ – удельная теплоемкость влажного тела.

5.2. Процессы абсорбции и адсорбции

Увлажнение вещества происходит в том случае, когда давление водяных паров в воздухе превышает давление водяных паров на поверхности продукта в результате испарения из него свободной влаги. В этом случае вещество поглощает влагу как за счет *адсорбции* (образования тонкого слоя на его поверхности) и *абсорбции* (путем объемного поглощения гидрофильными веществами), так и в результате капиллярной конденсации (при наличии макро- и микрокапилляров).

Абсорбция – это процесс поглощения отдельных компонентов из газовых смесей жидкими поглотителями – абсорбентами.

Процесс абсорбции используется, например, в спиртовом производстве при промывке водой газов, выделяемых при брожении, для улавливания паров этилового спирта. Абсорбция осуществляется при противотоке в аппаратах непрерывного действия при тесном контакте газа и сорбента (жидкости) (рис. 5.1).

Газ V (кмоль/ч), входящий в абсорбер, содержит какое-то количество поглощаемого компонента, концентрация которого равна y_H . На выходе из абсорбера количество газа не изменяется, а концентрация компонента снижается до величины y_k (кмоль/кмоль).

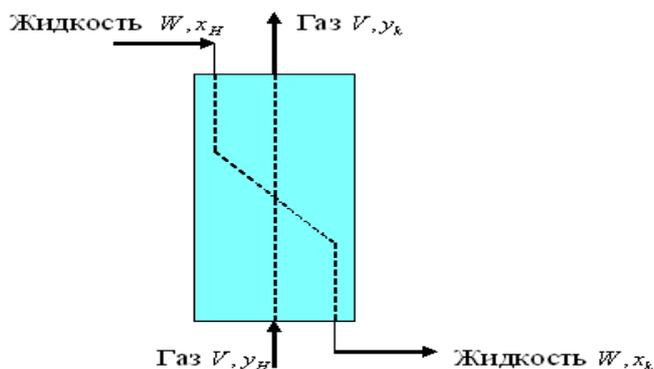


Рис. 5.1. Схема процесса абсорбции

Количество жидкого сорбента на входе в аппарат равно W . Содержание поглощаемого компонента в жидкости на входе и на выходе из аппарата равно соответственно x_H и x_k .

Уравнение материального баланса запишется как $Vy_H + Wx_H = Vy_k + Wx_k$. Из этого уравнения следует, что удельный расход сорбента равен отношению $m = W/V = (y_H - y_k)/(x_k - x_H)$.

При рассмотрении условий равновесия газа и сорбента используется правило фаз Гиббса. При протекании технологических процессов в аппаратах совокупности взаимодействующих компонентов образуют различные связанные системы. Эти системы могут быть однородными, имеющими одинаковые свойства, и неоднородными или многофазными, состоящими из нескольких фаз, разделенных друг от друга поверхностями раздела. Если состояние систем не изменяется во времени, то они являются стационарными или равновесными.

Чтобы вывести систему из состояния равновесия, нужно воздействовать на нее извне. К общим законам, определяющим условия равновесия систем относится принцип Ле-Шателье и правило фаз Гиббса, которое устанавливает зависимость между числом компонентов системы, числом фаз и числом степеней ее свободы. Это правило позволяет определить число переменных, влияющих на равновесие системы.

Применительно к процессу абсорбции имеются две фазы – газ и жидкость и три компонента – поглощаемое вещество, инертный газ и жидкость.

Определяющими параметрами процесса абсорбции являются давление, концентрации и температура:

$$S = k - f + 2,$$

где S – число степеней свободы;

k – число компонентов системы;

f – число фаз системы.

В данном случае (рис. 5.1) в число степеней свободы входят давление, температура и содержание одной из фаз. Поэтому содержание поглощаемого компонента в другой фазе будет зависеть от этих трех параметров.

Для идеальных растворов условия равновесия определяются законом Генри $x = p\psi$, где x – количество растворенного газа, отнесенное к поглощающей жидкости. Согласно этому закону растворимость газа прямо пропорциональна парциальному давлению газа над жидкостью. Парциальное давление в смеси газов равно $p = yp_o$, где y – доля компонента в газовой смеси, p_o – общее давление в смеси. Из этих двух уравнений следует уравнение фазового равновесия:

$$H = 1/p_o\psi.$$

Основное уравнение массопередачи при абсорбции:

$$G = k_a\tau F\Delta C,$$

где G – количество вещества, переданное из газовой фазы в жидкую, кг;

F – поверхность контакта фаз, м²;

ΔC – разность концентраций (кг/м³) или разность парциальных давлений (н/м²);

τ – длительность процесса, ч;

k_a – коэффициент абсорбции, кг/(м²·ч·н/м²).

Адсорбция – это процесс поглощения компонентов из газовых или жидких смесей твердым веществом – адсорбентом. Адсорбция происходит на поверхности любого материала

Процесс адсорбции используется в различных производственных

процессах для очистки растворов, воды, спирта от вредных примесей и запахов.

Процесс адсорбции во многом аналогичен процессу абсорбции, но является более сложным, поскольку, кроме поглощения сорбтива поверхностью адсорбента, происходит его проникновение в глубину сорбента, капиллярная конденсация и хемосорбция. Адсорбент в большинстве случаев находится в неподвижном состоянии, а газ профильтровывается через его слой.

Материальный баланс адсорбции записывается аналогично процессу абсорбции:

$$V(y_H - y_k) = W(x_k - x_H) = G,$$

где W – количество сорбента в аппарате;

x_H – начальное содержание сорбтива, отнесенное к единице массы сорбента;

x_k – конечное содержание сорбтива к концу работы аппарата.

Равновесная концентрация при адсорбции выражается законом Фрейндлиха:

$$x = ky^{1/n},$$

где x – концентрация сорбтива в поглотителе;

y' – концентрация поглощаемого компонента в газовой фазе над поглотителем при достижении равновесия;

k, n – константы.

Количество адсорбируемого вещества за время τ находится из уравнения:

$$G = \beta \tau F \Delta C,$$

где ΔC – средняя разность концентраций;

F – поверхность адсорбента;

β – коэффициент массопередачи при адсорбции.

Кинетический коэффициент β определяется экспериментальным путем с применением теории подобия. Например, при поглощении пара активированным углем для коэффициента адсорбции принимают

диффузионный критерий Нуссельта, равный $Nu' = 1,6Re^{0,54}$.

Первоначально адсорбенты использовали только в медицине для лечения отравлений. В начале XX века их стали применять в противогазах. С развитием пищевых и химических технологий адсорбция становится одним из важных процессов массообмена. С ее помощью удается практически очистить химические продукты от примесей, извлечь из смесей ценные вещества, даже при малой их концентрации.

В качестве адсорбентов в пищевых производствах используют активированный древесный уголь, силикагель, целлюлозную массу. Активированный уголь используется в ликероводочной промышленности для очистки водно-спиртовых растворов, в свекловично-сахарном производстве – для обесцвечивания сахарного сиропа. Целлюлозная масса применяется для осветления пива.

Адсорберы, используемые в пищевой промышленности, классифицируются на аппараты периодического и непрерывного действия, по состоянию адсорбента – на аппараты с подвижным и неподвижным адсорбентом, по конструкции – на аппараты колонного типа и фильтрпрессы и мешалки, по типу адсорбента и другим признакам.

5.3. Диффузионные аппараты

Практическим примером массообменного процесса является извлечение сахара из свекловичной стружки, которое осуществляется диффузионным способом.

Движущей силой процесса является разность концентраций. Для диффузии сахара из стружки в воду или диффузионный сок в аппарате должна поддерживаться разность между концентрациями сахара в стружке и диффузионном соке, что достигается при их встречном движении.

Коэффициент диффузии является физическим параметром материала и численно равен массе вещества, диффундирующего через единицу площади за

единицу времени при градиенте концентрации равном 1. Он зависит от температуры, вязкости растворителя, размера частиц вещества.

При использовании закона Фика принимается допущение, что стружка однородна по толщине и массовая доля сахара внутри стружки меняется линейно.

На рис. 5.2 приведена классификация диффузионных аппаратов, в которых осуществляется экстракция сахара из свекловичной стружки.

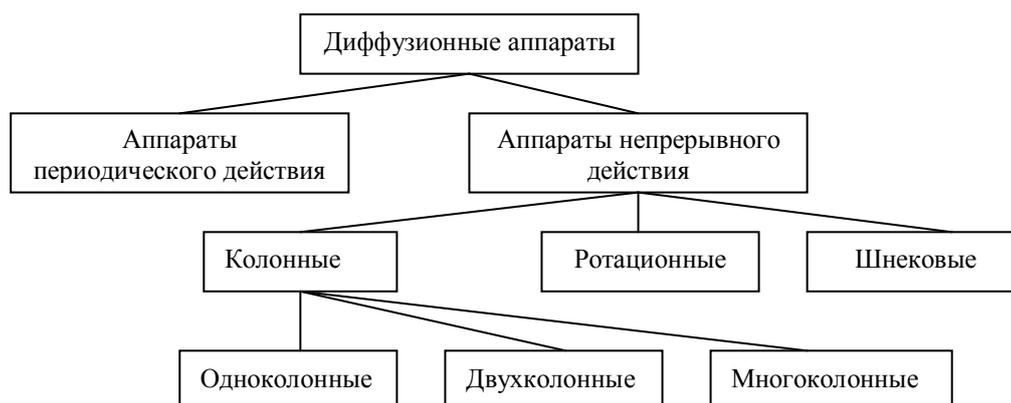


Рис. 5.2. Классификация диффузионных аппаратов

Эти аппараты обеспечивают обессахаривание стружки, противоточное перемешивание стружки и сока, минимальное содержание сахара в жоме, высокое качество диффузионного сока, небольшую продолжительность процесса диффундирования.

Массообменные процессы происходят также при получении этилового спирта на брагоректификационных колоннах. Так, например, уравнение материального баланса бражной колонны выглядит следующим образом:

$$M_b + P = G_d + P + B,$$

где P – масса греющего пара и его конденсата;

M_b – массовое количество бражки, поступающей на перегонку;

G_d – массовое количество пара, поступающего из бражной колонны;

B – масса барды без дистиллята водноспиртовых паров.

На рис.5.3 приведена классификация основных типов абсорберов.

Наибольшее распространение в промышленности находят насадочные и тарелочные абсорберы.

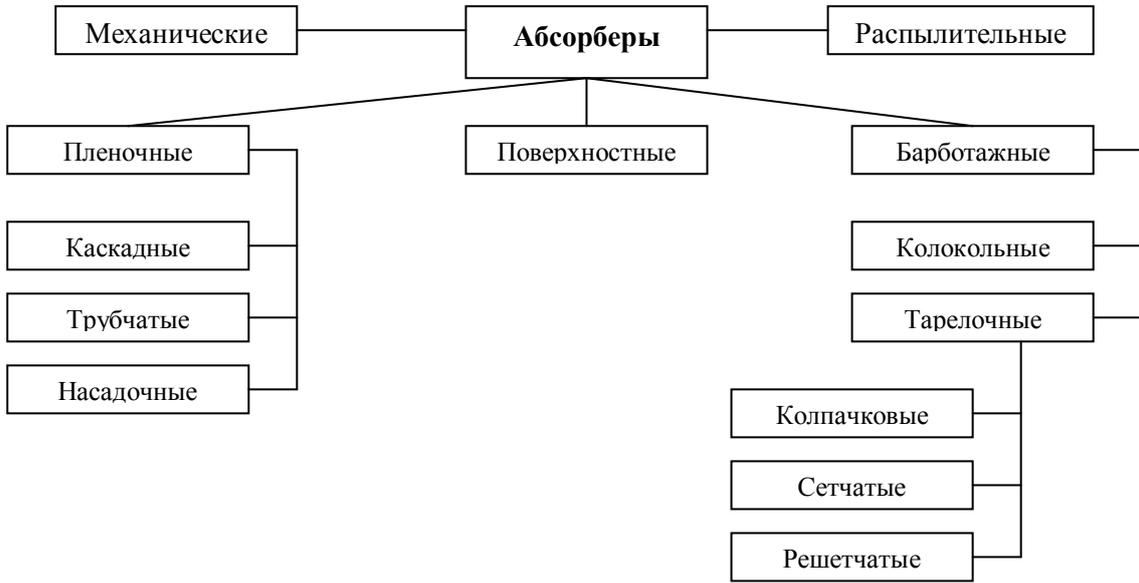


Рис 5.3. Классификация абсорберов

На рис.5.4. в качестве примера приведена схема тарельчатого абсорбера, служащего для поглощения компонентов из газовых смесей жидким абсорбентом.

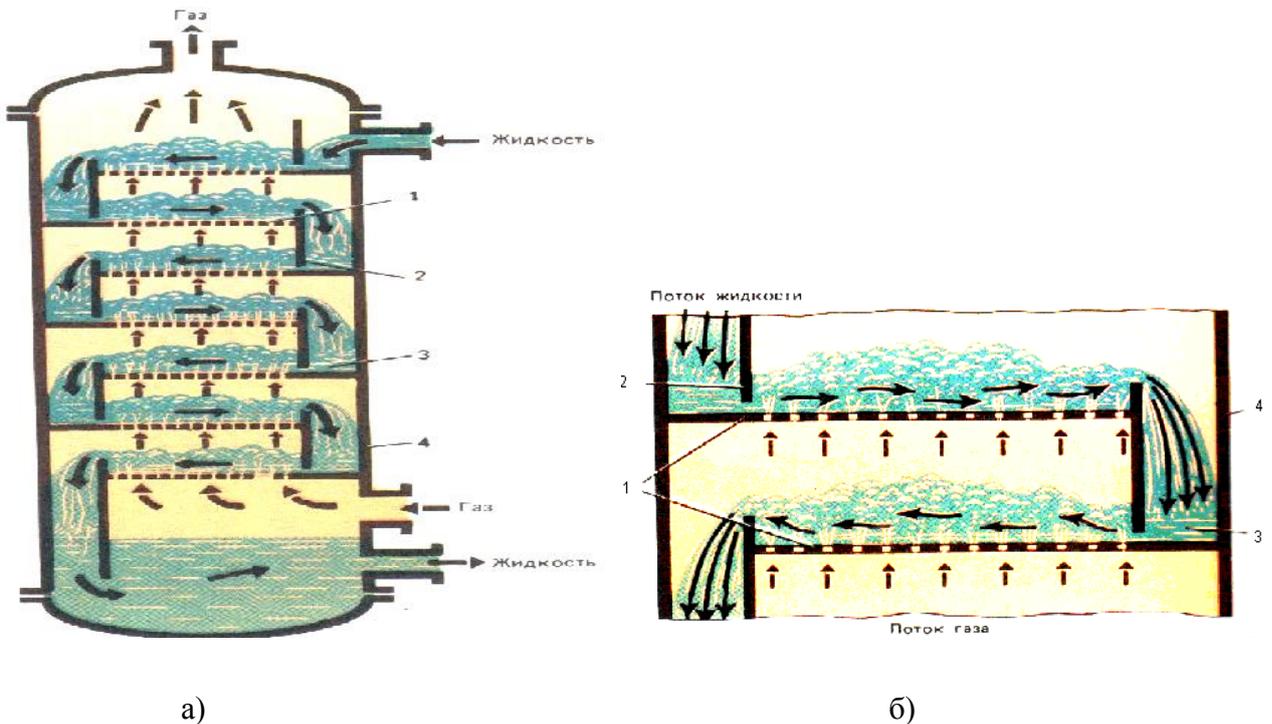


Рис.5.4. Схема тарельчатого абсорбера (а) и взаимодействие потоков между двумя тарелками (б):

1 – тарелки; 2 – перегородка; 3 – гидравлический затвор; 4 – корпус

В насадочных типах абсорберов в качестве насадок используется кокс, дробленый кварц, металлические сетки и спирали

Исходными данными для определения параметров абсорбера являются количество газа в единицу времени, содержание в газе поглощаемого компонента, остаточное содержание этого компонента в отходящем газе, объемы поступающей жидкости. В результате расчета определяются требуемый диаметр абсорбера, высота, занятая насадкой, поверхность контакта, количество вещества, переданное из газовой фазы в жидкую.

Лекция 6. Тепломассообменные процессы

Вопросы

6.1. Перенос теплоты и массы вещества в коллоидных капиллярно-пористых телах.

6.2. Анализ процессов тепломассообмена при сушке пищевых материалов.

6.3. Условия термодинамического равновесия при сушке.

6.4. Основные характеристики пищевых материалов, как объектов сушки.

6.5. Анализ процессов тепломассообмена при сушке пищевых материалов

Условные обозначения.

Глоссарий.

Контрольные вопросы.

6.1. Перенос теплоты и массы вещества в коллоидных капиллярно-пористых телах

Многие процессы пищевых производств, протекающие в технологическом оборудовании, сопровождаются одновременно процессами переноса массы вещества и теплообмена.

Влага, имеющая физико-механическую связь, удерживается в капиллярах и в зависимости от режима нагревания может перемещаться в теле в виде жидкости или в виде пара. Внутри влажного материала влага перемещается в направлении потока теплоты. Это создает в высушиваемом материале градиент

влажностоудержания.

Плотность потока жидкости и пара, проходящих через единицу поверхности, перпендикулярной направлению перемещения, в единицу времени, пропорционально градиенту влажностоудержания коллоидного капиллярно-пористого тела равна:

$$G_{ж} = -D_{ж}\rho_0(\partial u / \partial n), G_n = -D_n\rho_0(\partial u / \partial n),$$

где $G_{ж}, G_n$ – плотность потока жидкости и пара соответственно, кг/(м²·с);

$D_{ж}, D_n$ – коэффициенты диффузии для жидкости и пара соответственно;

ρ_0 – плотность абсолютно сухого материала;

$\partial u / \partial n$ – градиент влажностоудержания. Знак минус указывает, что в направлении нормали влажностоудержание уменьшается.

Общий поток влаги: $G_u = G_{ж} + G_n = -D\rho_0(\partial u / \partial n)$, где $D = D_{ж} + D_n$. Данное соотношение является основным законом перемещения влаги в коллоидном капиллярно-пористом теле, как в виде пара, так и в виде жидкости при наличии градиента влажностоудержания.

Коэффициент диффузии D включает четыре слагаемых, характеризующих перемещение определенного вида влаги:

$$D = \frac{D_a\mu_n}{RT\rho_0} \cdot \frac{\partial p}{\partial u} + D_0 + D_{кп} + D_{кж},$$

где $\frac{D_a\mu_n}{RT\rho_0} \cdot \frac{\partial p}{\partial u}$ – коэффициент диффузии, характеризующий перемещение адсорбционной влаги;

D_0 – коэффициент диффузии, характеризующий перемещение осмотической влаги;

$D_{кп}$ – коэффициент диффузии, характеризующий перемещение капиллярной влаги в виде пара;

$D_{кж}$ – коэффициент диффузии, характеризующий перемещение капиллярной влаги в виде жидкости;

μ_n – молекулярная масса пара;

R – универсальная газовая постоянная;

T - абсолютная температура;

$\frac{\partial p}{\partial u}$ – учитывает зависимость между давлением пара коллоидного тела p

и его влагосодержанием u .

При наличии в коллоидном капиллярно-пористом теле перепада температур будет наблюдаться поток влаги, обусловленный температурным градиентом, плотность потока которого пропорциональна этому градиенту:

$$G_t = -D\rho_0\delta(\partial t / \partial n),$$

где δ – термоградиентный коэффициент, 1/град;

$\partial t / \partial n$ – градиент температуры, град/м.

Данное уравнение является выражением *закона термовлагопроводности*.

При наличии внутри влажного материала градиента влагосодержания и градиента температуры влага начнет перемещаться вследствие влагопроводности и термовлагопроводности. Например, при контактной сушке направления градиентов совпадают, поэтому термовлагопроводность усиливает общую влагопроводность и процесс сушки ускоряется (рис. 6.1).

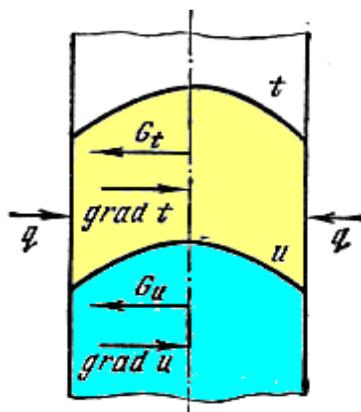


Рис. 6.1. Схема направления градиентов температуры и влагосодержания при контактной сушке продуктов

Из-за отдачи теплоты в окружающую среду поверхностные слои продукта охлаждаются и температура на поверхности становится ниже, чем внутри. Это распределение температуры вызывает температурный градиент, направленный от поверхности продукта к его середине и увеличивающий

общую влагопроводность.

Общий поток влаги равен сумме потоков:

$$G = G_u + G_t = -D\rho_0(\partial u / \partial n) + [-D\rho_0\delta(\partial t / \partial n)].$$

Это уравнение обобщенного закона перемещения влаги в коллоидных капиллярно-пористых телах.

При противоположных направлениях градиента влагосодержания и градиента температуры направление суммарного потока влаги зависит от соотношения сил влагопроводности $\partial u / \partial n$ и термовлагопроводности $\delta \partial t / \partial n$.

Например, при конвективной сушке вследствие прогрева материала с поверхности и испарения влаги внутри высушиваемого материала возникнет градиент влагосодержания $\partial u / \partial n$, направленный от поверхности к середине материала, а вследствие термовлагопроводности – градиент термовлагосодержания $\delta \partial t / \partial n$, направленный от середины к поверхности материала (рис.6.2). В результате возникнут два противоположных направления потока влаги – за счет влагопроводности G_u к поверхности, и за счет термовлагопроводности G_t - к середине.

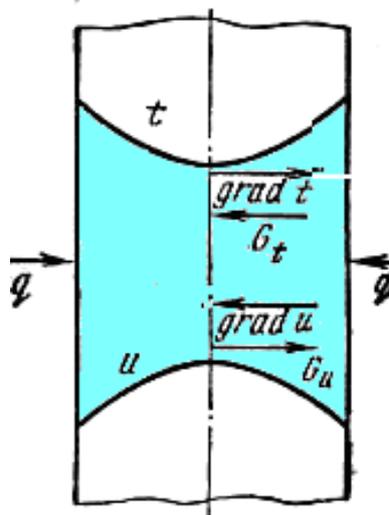


Рис.6.2. Схема направлений градиентов влагосодержания и температуры при конвективной сушке материала

Суммарный поток влаги равен:

$$G = G_u + G_t = -D\rho_0(\partial u / \partial n) - [-D\rho_0\delta(\partial t / \partial n)].$$

При большей интенсивности влагопроводности по сравнению с термовлагопроводностью влага будет перемещаться от внутренних слоев материала к поверхностным, и термовлагопроводность будет препятствовать перемещению потока влаги.

При большей интенсивности термовлагопроводности влага будет перемещаться по направлению потока теплоты, т.е. в направлении увеличения влагосодержания – от поверхности материала вглубь, а влагопроводность будет снижать поток влаги. Например, данное явление наблюдается при инфракрасной сушке и в процессе выпечки хлебобулочных изделий: перемещение влаги в направлении потока теплоты постепенно увеличивает градиент влажности, отчего влагопроводность растет. Через некоторое время возникнет равенство, т.е. термовлагопроводность будет полностью уравновешена влагопроводностью. В этот момент влажность в центральных слоях продукта остается постоянной, а высушивание происходит за счет углубления зоны испарения

Поток влаги от термовлагопроводности будет переносить с собой и дополнительную теплоту в направлении основного теплового потока, поэтому основной закон теплопроводности для случая нагревания влажных материалов выражается уравнением:

$$q = -ac\rho(\partial t / \partial n) - iG,$$

где $\partial t / \partial n$ – градиент температуры;

a – коэффициент температуропроводности;

c – удельная теплоемкость;

ρ – плотность материала продукта;

iG – количество теплоты, переносимое влагой;

i – энтальпия жидкости;

G – плотность потока влаги.

Из основного закона перемещения влаги и закона теплопроводности для влажных материалов получают систему уравнений, моделирующих перемещение теплоты и влаги во влажных материалах.

Дифференциальное уравнение переноса вещества выводится из основного уравнения переноса с использованием закона сохранения массы к некоторому произвольно взятому объему, ограниченному замкнутой поверхностью.

С учетом зависимости от температуры и влажности коэффициентов диффузии D , теплопроводности λ , термоградиентного коэффициента δ получают систему нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных. При допущении постоянства этих коэффициентов, используя закон переноса жидкости и преобразование Остроградского-Гаусса, можно получить дифференциальное уравнение переноса в следующем виде:

$$\partial u / \partial \tau = D_{ж} (\nabla^2 u + \delta_{ж} \nabla^2 t) + \varepsilon (\partial u / \partial \tau),$$

где ε – коэффициент, характеризующий долю влаги, перемещающейся в виде пара (критерий внутреннего испарения или фазового превращения).

При отсутствии внутреннего испарения ($\varepsilon = 0$) влага перемещается в виде жидкости, при $\varepsilon = 1$ изменение влагосодержания в продукте происходит только за счет испарения жидкости и конденсации пара при отсутствии переноса жидкости.

Дифференциальное уравнение переноса пара при $\varepsilon = 1$ имеет вид:

$$\partial u / \partial \tau = D_n (\nabla^2 u + \delta_n \nabla^2 t).$$

Для зональной системы расчета тепломассопереноса дифференциальные уравнения переноса имеют вид:

$$\begin{aligned} \partial t / \partial \tau &= a \nabla^2 t + \varepsilon (r / \bar{c}) \frac{\partial u}{\partial \tau}, \\ \partial u / \partial \tau &= D \nabla^2 u + D \delta \nabla^2 t \end{aligned}$$

где t – температура тела;

u – удельное влагосодержание;

$\bar{c} = c_0 + c_B u$ – удельная теплоемкость влажного материала;

c_0 – удельная теплоемкость сухого материала;

r – удельная теплота испарения;

$\partial u / \partial \tau$ – изменение влагосодержания в элементарном объеме в единицу

времени вследствие испарения или конденсации внутри материала;

∇^2 – оператор Лапласа.

Эти два уравнения полностью описывают внутренний тепло- и массоперенос и их решение при условии постоянства массообменных характеристик позволят теоретически рассчитать поля температуры и влагосодержания влажного материала. Значения D, δ, u, \bar{c} определяются экспериментально.

Аналитическое решение данных уравнений для коллоидных капиллярно-пористых тел не всегда возможно. Однако при наличии условий однозначности можно получить числа и уравнения подобия, с помощью которых определить числовые характеристики процесса переноса.

Из дифференциальных уравнений и граничных условий, характеризующих балансы влаги и теплоты, выводится ряд чисел подобия, например:

- число Фурье $Fo = a\tau/l^2, Fo = D\tau/l^2$, характеризующее гомохронность полей переноса теплоты и массы вещества;
- число Лыкова $Lu = D/a$, характеризующее инерционность поля влажности по отношению к инерционности температурного поля;
- число Писнона $Pn = \delta\Delta T / \Delta u$, характеризующее относительный перепад удельного влагосодержания к перепаду температуры;
- число Нуссельта $Nu = \frac{\beta l}{D}$, характеризующее интенсивность массоотдачи. Здесь величина l является толщиной пограничного слоя жидкости;
- диффузионный критерий Пекле, являющийся мерой отношения количества вещества, перенесенного конвекцией, к количеству вещества, перенесенному молекулярной диффузией $Pe = \frac{\omega l}{D}$;
- диффузионный критерий Прандтля, характеризующий связь концентрационных и скоростных полей в потоке, $Pr = \nu / D$, и др.

Коэффициенты тепло- и массопереноса при испарении жидкости со

свободной поверхности в условиях естественной конвекции рассчитываются по формулам, полученным Нестеренко А.В.:

$$Nu = 5,0(\text{Pr} \cdot \text{Ar})^{0,104} \text{ при } (\text{Pr} \cdot \text{Ar}) = 3 \cdot 10^6 \dots 2 \cdot 10^8,$$

$$Nu = 0,66(\text{Pr}_D \cdot \text{Ar})^{0,2} \text{ при } (\text{Pr} \cdot \text{Ar}) = 3 \cdot 10^6 \dots 2 \cdot 10^8.$$

В этих уравнениях коэффициент теплопроводности подсчитывается по формуле:

$$\lambda = \lambda_0 + 0,0041\varphi,$$

где λ_0 – коэффициент теплопроводности сухого газа;

φ – влажность газа.

При определении потоков теплоты и массы при внешнем тепло- и массообмене необходимо определять температуру поверхности, которая отлична от температуры в глубине жидкости, за исключением адиабатного процесса. Для неадиабатных условий температура поверхности с достаточным приближением равна:

$$- \text{ для условий свободной конвекции } \psi = 0,0135K^{-1,5}(\text{Ar} \cdot \text{Pr})^{0,06};$$

$$- \text{ для условий вынужденной конвекции } \psi = 0,00615K^{-0,96} \text{Re}^{0,34},$$

где $\psi = (t_{\text{ж}} - t_n)/(t_c - t_M)$, $K = (t_c - t_M)/(t_{\text{ж}} - t_M)$;

$t_{\text{ж}}$ – температура в толще воды;

t_n – температура поверхности воды;

t_M – температура воздуха по мокрому термометру.

Уравнения подобия процессов тепло- и массообмена при испарении жидкости с поверхности капиллярно-пористого тела:

$$- \text{ для теплообмена } Nu = 0,061\text{Re}^{0,77} \text{Pr}^{0,33} \text{Gu}^{0,09};$$

$$- \text{ для массообмена } Nu = 0,096\text{Re}^{0,75} \text{Pr}_D^{0,33} \text{Gu}^{0,144}.$$

Интенсивность тепло- и массопереноса прямо пропорциональна температуре, скорости движения потока и обратно пропорциональна влажности паровоздушной среды.

Механизм переноса теплоты и влаги при испарении из влажного материала (процесс сушки) отличается от механизма переноса при испарении

со свободной поверхности жидкости. Процесс сушки происходит при непрерывном углублении поверхности испарения и при постоянном увеличении толщины зоны испарения. При углублении поверхности испарения температура внутри материала ниже, чем на его внешней поверхности, в результате чего в зоне испарения создается температурный напор. С увеличением температурного напора по вектору потока теплоты (от поверхности внутрь тела) увеличивается коэффициент теплоотдачи. При углублении поверхности испарения коэффициент теплоотдачи больше чем при испарении с внешней поверхности.

При испарении влаги из высушиваемого материала с углублением поверхности испарения перенос пара идет через зону испарения. В микропорах молекулы пара и воздуха движутся независимо, т.е. перенос пара происходит *эффузией*.

Плотность эффузионного потока:

$$G_m = 1,064\psi\sqrt{\mu_n/R}\nabla(p_n/\sqrt{T}),$$

где μ_n – молекулярная масса пара;

p_n – парциальное давление пара;

ψ – коэффициент молекулярного течения, пропорциональный среднему радиусу капилляра.

Плотность диффузионного потока вещества:

$$G = -\frac{\mu_n D_p}{RT(p - p_n)} \varepsilon \nabla p_n,$$

где p, p_n – барометрическое и парциальное давления пара соответственно;

ε – коэффициент пористости материала;

∇ – оператор Гамильтона.

Потенциалом диффузионного переноса является p_n , потенциалом эффузионного – p/\sqrt{T} . При капиллярах радиусом более 10^{-5} см через зону испарения осуществляется смешанный диффузионно-эффузионный перенос.

Поскольку температура поверхности испарения меньше температуры на

внешней поверхности материала, то в зоне испарения возникает градиент эффузионного переноса, что способствует интенсивному переносу пара через зону испарения.

Диффузионный перенос в микрокапиллярах осложняется явлением теплового скольжения. При значительной длине капилляра возникает перепад температуры и появляется циркуляция воздуха, направленная у стенок капилляра против потока теплоты, а по оси – по направлению потока. Поскольку у поверхности испарения внутри материала температура меньше, чем у внешней поверхности, то возникает движение газа к поверхности материала. Тепловое скольжение усиливает перенос пара через зону испарения.

Перенос теплоты и вещества с поверхности материала в окружающую среду осуществляется теплопроводностью и диффузией. При этом интенсивный эффузионный перенос пара в зоне испарения и тепловое скольжение создают градиент давления в данной зоне, что изменяет механизм переноса пара в пограничном слое. Пар на выходе из зоны испарения турбулизует пограничный слой воздуха около поверхности материала, в результате чего повышается интенсивность массообмена.

Т.о., тепло- и массообмен между поверхностью влажного материала при его высушивании и окружающей средой рассматривается в виде сочетания тепло- и массопереноса в зоне испарения внутри материала и в пограничном слое воздуха.

Основными коэффициентами переноса являются коэффициенты теплопроводности, диффузии, температуропроводности и термовлагопроводности.

В сухом состоянии теплообмен происходит без массообмена и рассчитанные коэффициенты теплопроводности практически совпадают с действительными.

В сухом капиллярно-пористом теле передача теплоты осуществляется теплопроводностью через твердый скелет тела и конвекцией и излучением между стенками пор. Эти виды теплопереноса определяются эквивалентным

коэффициентом теплопроводности $\lambda_{\Sigma} = \lambda_{\mu} + \lambda_{\kappa} + \lambda_{\eta}$. Плотность теплового потока в этом случае равна:

$$q = \lambda_{\Sigma} \Delta t / l,$$

где l – размер поры;

Δt – перепад температуры в порах тела.

Во влажных телах теплообмен всегда сопровождается массообменом. При этом возникает градиент переноса вещества, зависящий от температуры, поэтому экспериментальные значения коэффициента теплопроводности соответствуют эквивалентным, а не истинным значениям. Разница равна дополнительному потоку теплоты, вызванному переносом вещества и отнесенному к единичному градиенту температуры ($\Delta t = 1$), т.е. $\lambda_{\Sigma} = \lambda + rD\rho_0\delta$.

Коэффициент температуропроводности равен:

$$a = \lambda / c_B \rho_0,$$

где $c_B = c_0 + c_{\text{ж}}$ – удельная теплоемкость влажного тела.

Практическим примером массообменного процесса является извлечение сахара из свекловичной стружки, которое осуществляется диффузионным способом.

Движущей силой процесса является разность концентраций. Для диффузии сахара из стружки в воду или диффузионный сок в аппарате должна поддерживаться разность между концентрациями сахара в стружке и диффузионном соке, что достигается при их встречном движении.

Коэффициент диффузии является физическим параметром материала и численно равен массе вещества, диффундирующего через единицу площади за единицу времени при градиенте концентрации равном 1. Он зависит от температуры, вязкости растворителя, размера частиц вещества.

При использовании закона Фика принимается допущение, что стружка однородна по толщине и массовая доля сахара внутри стружки меняется линейно.

На рис. 6.3 приведена классификация диффузионных аппаратов, в

которых осуществляется экстракция сахара из свекловичной стружки.



Рис. 6.3. Классификация диффузионных аппаратов

Эти аппараты обеспечивают обезсахаривание стружки, противоточное перемешивание стружки и сока, минимальное содержание сахара в жоме, высокое качество жомов, возможность работы в режиме непрерывного процесса диффундирования.

Массообменные процессы происходят также при получении этилового спирта на брагоректификационных колоннах. Так, например, уравнение материального баланса бражной колонны выглядит следующим образом:

$$M_{БР} + P = G_n + B,$$

где P – масса греющего пара и его конденсата;

$M_{БР}$ – массовое количество бражки, поступающей на перегонку;

G_n – массовое количество пара, поступающего из бражной колонны;

B – масса барды без дистиллята водноспиртовых паров.

6.2. Анализ процессов тепломассообмена при сушке пищевых материалов

Процессы тепломассопереноса особенно интенсивно проходят в процессе сушки пищевых продуктов.

Сушка относится к сложным технологическим процессам и зависит от большого числа факторов, однако во всех случаях при сушке в виде пара или жидкости удаляется влага.

Влажные материалы разделяются на следующие группы:

- растворы кристаллоидов;
- коллоидные растворы;
- кристаллические тела, содержащие влагу (сахар, соль и др.);

– коллоидно-дисперсные системы.

Коллоидные тела по Лыкову А.В. делятся в свою очередь на три группы:

- эластичные гели (желатин, агар-агар, прессованное мучное тесто и др.);
- хрупкие гели (древесный уголь, керамические материалы и др.);
- коллоидные капиллярно-пористые тела (торф, древесина, зерно, хлеб, фрукты и овощи и пр.).

Чтобы выбрать наиболее эффективный и энергосберегающий способ процесса высушивания тех или иных материалов, нужно знать в первую очередь ответ на вопрос – каким образом связана влага с высушиваемым материалом? В предыдущих разделах при характеристике дисперсных систем мы рассматривали формы и виды связи влаги. Сейчас этот вопрос мы рассмотрим с инженерных позиций и более подробно:

- химическая связь влаги в материале – две формы: ионная связь или молекулярная;
- физико-химическая связь – адсорбционная, структурная, осмотическая;
- механическая связь – три формы: влага в микрокапиллярах, влага в капиллярах и порах, влага смачивания.

Из этих видов связей наиболее прочной является химическая связь. Для разрушения этой связи помимо обычной сушки требуется прокалывание материала или проведение определенных химических реакций.

Адсорбционно-связанная влага, исходя из понятия адсорбции, удерживается молекулярно силовым полем на поверхности раздела коллоидных частиц с внешней средой. Эта влага прочно связана с коллоидными частицами материала, и эта связь сопровождается при образовании выделением тепла (тепло гидратации)

Структурная влага – это влага, попадающая внутрь клеток растительных тканей. Данный вид влаги, как и осмотически удерживаемой и находящейся первоначально внутри клеток, характеризуется тем, что при присоединении ее к материалу не выделяется тепло. Эти виды влаги связаны с материалом менее прочно, чем адсорбционная влага.

Механически связанная влага находится в капиллярах тела и на их поверхности. Капилляры различных тел имеют значительный разброс по диаметрам. Средний радиус микрокапилляров составляет 10^{-5} см.

Влага, находящаяся на поверхности тела, называется *влажностью смачивания* и, как и влага макропор, имеет довольно непрочную связь с материалом, в котором она находится.

Распределение влаги на поверхности и в объеме материала неравномерно, поэтому учитывают среднюю концентрацию влаги или концентрацию в данной точке

Принципиальная схема процесса сушки выглядит следующим образом (рис. 6.4).

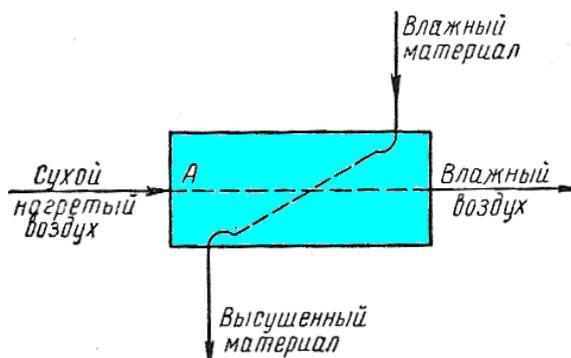


Рис. 6.4. Схема процесса сушки

Влагосодержанием тела U называется отношение массы влаги W , содержащейся в теле, к массе сухого тела, т.е. $U = W / G$.

Влажность тела выражается как:

$$w = \frac{W}{W + G} = \frac{U}{1 + U}.$$

Влажный воздух, являющийся сушильным агентом и представляющий собой смесь сухого воздуха с паром, характеризуется набором показателей, таких как барометрическое давление, парциальное давление водяного пара, абсолютной и относительной влажностью, влагосодержанием, энтальпией или теплосодержанием и др.

пшеничный Макаронные изделия	1,0	2,0	3,1	4,6	6,5	8,5	11,4	13,9	18,9
Печенье	5,0	7,1	8,75	10,6	12,2	13,75	16,6	18,85	22,4
Крахмал	2,1	2,8	3,3	3,5	5,0	6,5	8,3	10,9	14,9
Яблоки	2,2	3,8	5,2	5,2	7,4	8,3	9,2	10,6	12,7
Рожь	-	-	5,0	-	11,0	18,0	25,0	40,0	60,0
Пшеница	6,0	8,4	9,5	12,0	12,5	14,0	16,0	19,5	26,0
Овес	-	-	9,3	-	-	13,0	-	-	24,0
	4,6	7,0	8,6	10,0	11,6	13,6	15,0	18,0	22,5

Очевидно, что с помощью воздуха с определенной его влажностью невозможно удалить всю влагу из высушиваемого материала. Удаляемая влага:

$$W_{вд} = \omega - \omega_p,$$

где ω – влажность материала;

ω_p – равновесная влажность

Кинетика процесса сушки. При конвективной сушке влага перемещается от центра материала к периферии, где поверхность его омывается сушильным агентом. Миграция влаги осуществляется в основном диффузионным путем, движущей силой которого является разность между концентрациями влаги в разных точках материала. При этом на процесс перемещения влаги большое влияние оказывает тепловое воздействие на материал.

Перемещение влаги в материале может быть в виде жидкости и (или) в виде пара, что определяется характером связи влаги и свойствами самого материала. Так, осмотически связанная влага будет мигрировать через стенки клетки в виде жидкости, а адсорбционно-связанная влага будет перемещаться в виде пара. Чем больше влагосодержание материала, тем в большей степени преобладает миграция влаги в виде жидкости. Экспериментально установлено, что под влиянием температурного градиента от действия термодиффузии, уменьшения поверхностного натяжения или расширения воздуха в капиллярах влага перемещается в материале по направлению потока тепла. Общее количество влаги, перемещаемое под действием температурного градиента, выражается уравнением $Q_i = -kf \frac{dt}{dx} \tau$.

Изменение во времени средних по объему тела влагосодержаний \bar{U} и

температур \bar{T} характеризует *кинетику* процессов сушки и нагрева, $\bar{U} = U(\tau), \bar{T} = T(\tau)$.

Интенсивность сушки определяется скоростью сушки $\frac{d\bar{U}}{d\tau}$, которая по мере приближения к состоянию равновесия стремится к нулю.

На процесс сушки наиболее сильное влияние оказывает внутренняя структура материала. Например, для дисперсных материалов с частицами более 2 мм и критическим радиусом пор менее 2 нм длительность конвективной сушки составляет более одного часа, а с критическим радиусом пор более 100 нм – 0,5...3с.

На рис. 6.5 приведены характерные зависимости кривых сушки от температуры и влажности теплоносителя, $t_3 > t_2 > t_1; \varphi_1 > \varphi_2 > \varphi_3$.

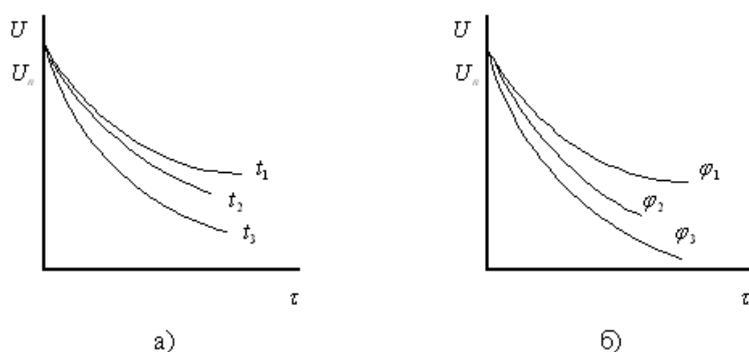


Рис.6.5. Характер зависимости кинетики кривой сушки $U(\tau)$ от температуры (а) и влажности (б) теплоносителя

Интенсивность процесса сушки достигается увеличением температуры и скорости теплоносителя, уменьшением его начальной влажности дроблением, прессованием, применением энергетических полей и т.п.

С физических позиций процесс сушки включает три операции:

- перемещение влаги внутри материала к его поверхности;
- парообразование;
- перемещение пара от поверхности материала в окружающую среду.

Последняя операция характеризуется следующими явлениями: на поверхности тела образуется воздушно-паровой слой, находящийся в

равновесии с влагой материала. Движущей силой движения влаги из поверхностной пленки в окружающую среду является разность парциальных давлений водяного пара в пограничном слое и окружающей среде. Количество продиффундировавшего пара будет равно:

$$G = B(p_n - p_o)F\tau,$$

где B – коэффициент испарения;

p_n, p_o – парциальное давление водяного пара в пограничном слое и окружающей среде соответственно;

F – поверхность испарения.

Количество влаги, прошедшее через пограничный слой, равно количеству влаги, которая подошла из глубин материала, что собственно и определяет скорость сушки.

Кривая сушки строится в координатах «влажность материала - время». На рис. 6.6. приведена теоретическая кривая сушки коллоидного капиллярно-пористого тела.

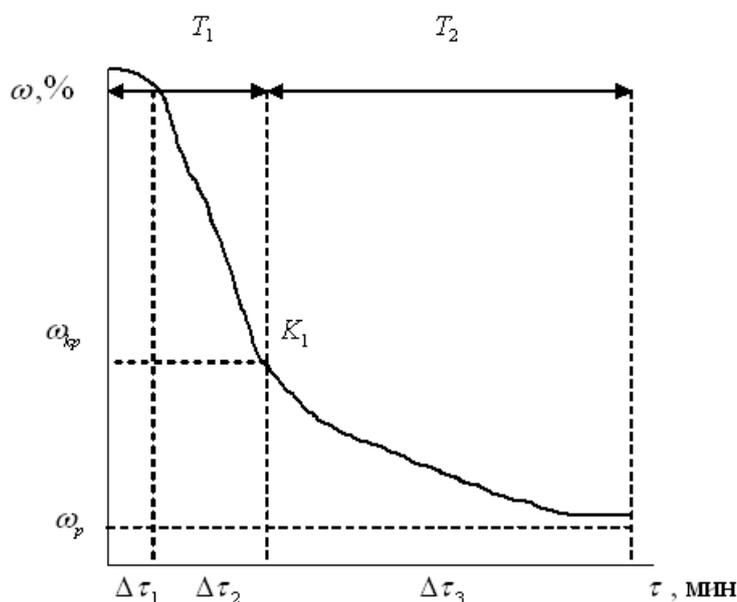


Рис. 6.6. Характерная кривая сушки капиллярно-пористого тела:
 T_1 – период постоянной скорости сушки; T_2 – период падающей скорости; K_1 – критическая точка; $\omega_{кр}$ – критическая влажность; ω_p – равновесная влажность;
 $\Delta\tau_1$ – период прогрева тела

В первый период сушки происходит удаление свободной влаги (влаги

микрокапилляров и влаги смачивания). В этот период давление пара над материалом равно давлению пара чистой испаряющейся жидкости. Во втором периоде происходит удаление связанной влаги.

6.3. Условия термодинамического равновесия при сушке

Состояние системы «влажное тело – газ» является равновесным, если оно не изменяется во времени под действием как внутренних, так и внешних факторов.

Если влажное тело находится в равновесии с газом – смесью паров испаряемой жидкости и воздуха, то при этом происходят взаимобратные процессы испарения и конденсации, т.е. равновесие носит динамический характер. Чтобы не происходили процессы переноса жидкости или пара под действием механических причин, должно быть установлено механическое равновесие. Для этого необходимо равенство сил, действующих на границе раздела сред. Если границей раздела будет являться плоскость, то равенство сил сводится к равенству давлений по обе стороны границы. Если граница раздела будет представлять собой искривленную поверхность, то равенство давлений нарушится действием сил поверхностного натяжения.

Для устойчивого равновесия должно соблюдаться и тепловое равновесие. Кроме того, должно выполняться еще одно условие, запрещающее фазовые превращения жидкости в газ. Таким условием является равенство химических потенциалов $\hat{\mu}$ жидкой и газообразной фаз, т.е. $\hat{\mu}_ж = \hat{\mu}_г$. Величина $\hat{\mu}$ зависит от концентрации вещества в фазе.

Таким образом, в устойчивом равновесном состоянии системы «влажное тело – смесь паров влаги с теплоносителем» должно выполняться механическое и тепловое равновесие и равенство химических потенциалов влажного тела и газа.

Исследование равновесного состояния влажного материала с газом является важным для определения движущей силы процесса сушки. Равновесное состояние системы характеризуется изотермами сорбции-

десорбции, которые представляют собой зависимости равновесного влагосодержания материала от равновесной относительной влажности в процессе сорбции или десорбции при постоянной температуре.

Сорбцией называется процесс, при котором продуктом поглощаются из окружающей среды пары или газы. Процесс, обратный сорбции, называется десорбцией. Так как при сорбции и десорбции паров и газов происходит изменение качественных показателей пищевых продуктов, то необходимо устанавливать количество поглощаемых газов различными продуктами в зависимости от условий хранения, а также влияние поглощенного вещества на свойства того или иного продукта.

Увлажнение продукта происходит в том случае, если давление водяных паров в воздухе превышает давление водяных паров на поверхности продукта в результате испарения части из него свободной влаги. В этом случае продукты поглощают влагу как за счет адсорбции (образования тонкого слоя на его поверхности), абсорбции (путем объемного поглощения гидрофильными веществами), так и в результате капиллярной конденсации (при наличии макро- и микрокапилляров).

Процесс адсорбции широко используется в различных производственных процессах (для очистки растворов, воды, спирта от вредных примесей и запахов).

Поглощение продуктом газов или паров с образованием химических соединений называется хемосорбцией.

Десорбция влаги продуктом происходит в том случае, когда давление водяных паров на поверхности продукта будет превосходить давление водяных паров в воздухе. Процессы сорбции или десорбции влаги продуктом идут до приобретения им равновесной влажности, когда давление водяного пара в воздухе и на поверхности продукта становится равным.

Сорбция материалом влаги из газа является сложным процессом, состоящим из физической и химической адсорбции влаги и капиллярной конденсации пара в капиллярах пор.

Согласно теории БЭТ, названной по имени ее создателей (Брунауэр, Эммет, Теллер), при адсорбции газов и паров твердым телом образуется полимолекулярный слой адсорбированного вещества в самом начале процесса. При этом с поверхностью адсорбента прочно связан только первый слой молекул адсорбированного вещества. Вид изотермы БЭТ приведен на рис. 6.7.

$$U_p = \frac{U_m K w}{(1-w)[1+(K-1)w]}, \text{ где } K = \text{const}, \text{ зависящая от теплоты сорбции и}$$

абсолютной температуры. В пористых телах полимолекулярная адсорбция осложняется капиллярной конденсацией. Вид изотерм сорбции зависит от радиуса пор r и давления или влажности воздуха. При этом сорбционная и десорбционная ветви изотермы не совпадают.

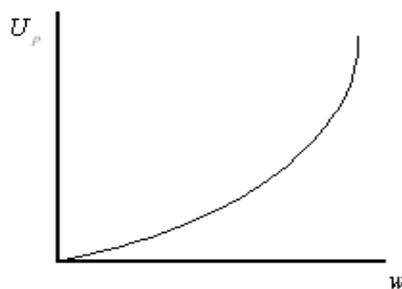


Рис.6.7. Изотерма полимолекулярной адсорбции

Поскольку в процессе сушки влажный материал стремится к фазовому равновесию, при котором наблюдается равенство химических потенциалов, то при достижении такого равновесия процесс сушки прекращается. Отсюда следует, что сушка относится к неравновесным процессам, обусловленным разностью химических потенциалов.

Многие процессы переноса описываются градиентным линейным законом (законы Фурье, Фика, Ньютона для жидкостей), гласящим, что плотность потока переноса \vec{j} пропорциональна градиенту потенциала $\nabla\Pi$, т.е. $\vec{j} = -\lambda_n \nabla\Pi$. Знак минус указывает на то, что плотность потока потенциала направлена в сторону убывания этого потенциала. Для процесса сушки можно записать $\vec{j}_M = -\lambda_M \nabla\mu$, где \vec{j}_M – плотность потока массы.

Закономерности сушки влажных материалов обуславливаются

одновременным протеканием переноса теплоты и массы:

- теплообмен между поверхностью материала и окружающей средой;
- испарение влаги с поверхности материала в окружающую среду (массоотдача);
- перемещение теплоты внутри материала (теплоперенос);
- перемещение влаги внутри материала (массоперенос).

Рассмотрим несколько подробней механизм высушивания влажных пищевых продуктов.

При влажности высушиваемых материалов более 30% поверхность тела покрыта сплошной пленкой влаги. Влагой заполнены все микрокапилляры ($r < 10^{-7} \text{ м}$) и большинство макрокапилляров ($r > 10^{-7} \text{ м}$). Влага испаряется с поверхности пленки, перемещается через пограничный слой к окружающей газовой среде под действием диффузии и отводится от поверхности тела в результате конвективной диффузии. Основное сопротивление на пути массопереноса влаги от пленки к среде оказывает ламинарный пограничный слой. Скорость диффузии газа через этот слой определяет интенсивность испарения влаги с поверхности тела.

При влажности материала больше гигроскопической пар, образующийся у поверхности, является насыщенным, а температура поверхности тела в случае конвективной сушки равна температуре мокрого термометра. Скорость сушки остается примерно постоянной. После исчезновения сплошной пленки влага начинает испаряться с концевых участков капилляров. Интенсивность сушки при этом увеличивается. При достижении материалом влажности меньше гигроскопической интенсивность сушки резко падает, а температура поверхности тела постепенно увеличивается. Поверхность испарения начинает перемещаться вглубь тела.

Тепло для испарения влаги передается от теплоносителя к поверхности тела и затем в результате теплопроводности проникает вглубь. Количественным показателем, характеризующим перенос влаги и тепла, являются числа Био:

- Bi' – для массообмена;
- Bi – для теплообмена.

При больших значениях числа Bi' ($Bi' > 50 \dots 60$) условия массообмена определяются в основном свойствами материала, а влияние внешних факторов на процесс сушки незначительно. К таким материалам относятся материалы с ультра микропорами, влага в которых перемещается в результате твердотельной диффузии, поэтому коэффициенты диффузии очень малы и составляют от 10^{-10} до 10^{-12} м²/с. С уменьшением числа Bi' ($Bi' < 0,1 \dots 0,2$) скорость сушки не зависит внутри диффузионного сопротивления материала, что позволяет интенсифицировать процесс сушки организацией соответствующей гидродинамической обстановки в аппарате. К таким материалам относятся сыпучие микропористые материалы со свободной или слабосвязанной влагой.

Расчет сушильных аппаратов при сушке материалов с известными свойствами основывается на составлении материального и теплового баланса и на условии, что время сушки, определяемое кинетикой процесса, не должно превышать фактическое время сушки, определяемое гидродинамикой аппарата.

Уравнение материального баланса можно составить для всех материальных потоков, проходящих через сушилку:

- по сухому материалу G_M ;
- по испаряемой влаге W ;
- по сушильному агенту G_r .

Например, $G_M U_H = G_M U_K + W$, где U_K, U_H – конечное и начальное влагосодержание материала соответственно, или $G_M (U_H - U_K) = G_r (X_K - X_H)$, где X_K, X_H – конечное и начальное влагосодержание сушильного агента соответственно.

Тепловой баланс для сушильной камеры записывается в виде:

$$G_r I_H + G_M (c_M + c_{ж} U_H) \theta_H = G_r I_K + G_H (c_H + c_{ж} U_K) \theta_H,$$

где I_H, I_K – начальная и конечная энтальпия сушильного агента;

θ_H, θ_K – начальная и конечная температура материала;

c_M, c_J – теплоемкость материала и жидкости.

При составлении теплового баланса принимают допущение, что процесс сушки близок к процессу при постоянном давлении, это позволяет считать, что количество тепла равно количеству энтальпии.

При тепловых расчетах реальных сушильных аппаратов учитываются потери тепла на перегрев образующегося пара, нагрев материала и транспортирующих элементов сушилки, потери в окружающую среду.

Перенос тепла в неподвижной среде и в пограничном слое обусловлен молекулярной теплопроводностью. Плотность потока тепла в соответствии с законом Фурье равна:

$$\vec{j}_T = -\lambda_T \nabla T,$$

где λ_T – молекулярная теплопроводность среды;

∇T – температурный градиент.

При конвективном переносе тепла плотность потока выразится как:

$$\vec{j}_T = \vec{v}_r \rho_r c_r T,$$

где \vec{v}_r, ρ_r, c_r – соответственно скорость, плотность и теплоемкость газового потока.

В пограничном слое доминирует молекулярный перенос, в глубине поверхности преобладает турбулентный и конвективный. Диффузионный и конвективный перенос тепла описывается уравнением конвективной теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + (\nabla T \vec{v}_r) = a_\Sigma \nabla^2 T,$$

где $a_\Sigma = \frac{\lambda_T + \lambda_T^*}{\rho_r c_r}$ – суммарная температуропроводность, обусловленная молекулярным и молярным переносом тепла.

Уравнение конвективной диффузии для пара имеет аналогичный вид:

$$\frac{\partial C_n}{\partial \tau} + (\nabla C_n \vec{v}_r) = \lambda_\Sigma \nabla^2 C_n,$$

где λ_{Σ} – суммарный коэффициент диффузии, обусловленный молекулярным и молярным переносом вещества;

C_n – концентрация влаги.

Процесс сушки при активных гидродинамических режимах характеризуется значительным числом параметров, изменяющихся по нелинейным законам, поэтому исследование закономерностей процесса целесообразно проводить на моделях. Структура модели определяется гидродинамическими параметрами и проявляется в характере распределения времени пребывания материала в аппарате. В зависимости от группы материала, как объекта сушки проводят моделирование гидродинамики, когда математическая модель совпадает с гидродинамической, или добавляют уравнение кинетики сушки, а в некоторых случаях и теплообмена.

При моделировании гидродинамики возможны два подхода: первый заключается в описании движения потока частиц материала с учетом их взаимодействия, второй – в аппроксимации типовыми моделями. Вторым подход включает:

- выбор структуры потока;
- составление балансового уравнения относительно концентраций вещества в потоке;
- экспериментальная проверка параметров гидродинамической модели.

Распределение времени пребывания частиц материала в аппарате подчиняется статистическим законам распределения и находится по виду сигнала, проходящего через систему. Таким сигналом является подача индикатора на вход в виде импульса возмущения. В зависимости от вида функции распределения все многообразие моделей потоков, вне зависимости от типа сушилки можно представить в виде типовых моделей:

- идеального вытеснения;
- идеального смешения;
- диффузионной;
- ячеечной;

– комбинированной.

Для решения дифференциальных уравнений, описывающих гидродинамику, удобно использовать преобразование Лапласа. Имея гидродинамическую модель аппарата можно получить функцию распределения по времени пребывания частиц в аппарате.

Известны дифференциальные и интегральные функции распределения, которым соответствуют C – кривые и F – кривые отклика на импульсное возмущение на входе в систему.

Пусть:

$F(\tau)$ – интегральная функция распределения, т.е. доля частиц, находящихся в аппарате в течение времени τ или меньше τ ;

$f(\tau)$ – дифференциальная функция распределения, т.е. доля частиц, время пребывания которых в аппарате находится в интервале времени от τ до $\tau + \Delta\tau$. Входным параметром является концентрация вещества на входе в аппарат $C_0(\tau)$, выходным – концентрация на выходе $C_f(\tau)$.

Если $C_0(\tau) = \delta(\tau)$, где $\delta(\tau) = \begin{cases} 0 & \text{при } \tau \neq 0 \\ \infty & \text{при } \tau = 0 \end{cases}$, то $C_f(\tau) = \omega(\tau)$ – функция веса.

Если $C_0(\tau) = 1(\tau)$ – единичная функция, где $1(\tau) = \begin{cases} 0 & \text{при } \tau < 0 \\ 1 & \text{при } \tau \geq 0 \end{cases}$, то $C_0(\tau) = h(\tau)$ – переходная функция.

Если на входе в аппарат концентрация есть дельта-функция, то на выходе из аппарата концентрация равна дифференциальной функции распределения частиц по времени их пребывания в аппарате и зависимость $C_f(\tau)$ называется C - кривой.

Если на входе в аппарат концентрация есть единичная функция, то на выходе концентрация равна интегральной функции распределения частиц во времени пребывания и зависимость $C_f(\tau)$ называется F - кривой.

Передаточной функцией модели называется отношение преобразованного по Лапласу выхода к входу $W(p) = C_f(p) / C_0(p)$. По передаточной функции

можно написать дифференциальное уравнение модели и найти $C_f(p)$. Кривая распределения $f(\tau)$ характеризуется моментами. Обычно ограничиваются рассмотрением первого начального момента, соответствующего среднему времени пребывания материала в аппарате и второго центрального момента, соответствующего дисперсии распределения времени пребывания.

Рассмотрим некоторые модели.

Модель идеального смешения. Сущность этой модели в том, что концентрация одинакова в любых токах аппарата. Модель описывается уравнением:

$$\frac{dC}{d\tau} = \frac{v}{V}(C_0 - C),$$

где C_0, C – концентрация на входе и на выходе соответственно;

v – объемный расход потока, м³/с;

V – объем зоны идеального смешения, м³.

Преобразование по Лапласу данного уравнения представляется следующим выражением $pC(p) = \frac{v}{V}[C_0(p) - C(p)]$, отсюда передаточная функция

$W(p) = \frac{C(p)}{C_0(p)} = \frac{1}{Tp + 1}$, где $T = V/v$. Если $C_0(\tau) = \delta(\tau)$, то функция концентрации

будет равна $C(\tau) = \frac{1}{T} \exp(-\tau/T)$.

Ячеечная модель. Модель содержит n последовательно соединенных ячеек. Передаточная функция i -ой ячейки $W_i(p) = \frac{C_i(p)}{C_{i-1}(p)} = \frac{1}{T_i p + 1}$, $i = 1, 2, \dots, n$.

Для одинаковых ячеек $W_i(p) = \frac{1}{(T_i p + 1)^n}$, где $T = V_{\text{яч}} / v$.

Если $C_0(\tau) = \delta(\tau)$, то переходя от изображения к оригиналу, получим

$$C_f(\tau) = \frac{1}{T^n} \exp(-\tau/T) - \frac{\tau^{n-1}}{(n-1)!}.$$

Модель идеального вытеснения. Согласно данной модели все частицы движутся с одинаковой скоростью. Уравнение модели идеального вытеснения выглядит следующим образом:

$$\frac{dC}{d\tau} = -\omega \frac{dC}{dx},$$

где ω – скорость потока, м/с;

x – координата.

В этом случае $C = f(\tau, x)$.

Передаточная функция модели идеального вытеснения:

$$W(p) = \frac{C(p, L)}{C(p, 0)} = \exp(-Lp / \omega) = \exp(-\tau_0 p),$$

где L – размер аппарата, м;

$\tau_0 = L / \omega$ – время запаздывания, с.

Любой сигнал на входе через время, равное τ_0 точно повторяется на выходе.

Однопараметрическая диффузионная модель. Согласно этой модели в объеме существуют два потока: основной, движущийся со скоростью ω , и диффузионный поток:

$$q_x = -D_x \frac{dC}{dx},$$

где q_x – количество вещества, проходящего через единицу поверхности в единицу времени, кг/(м² · с);

D_x – коэффициент диффузии вдоль оси x .

Дифференциальное уравнение данной модели $\frac{\partial C}{\partial \tau} = -\omega \frac{\partial C}{\partial x} + D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$.

Для составления гидродинамических моделей используют массовые расходы, массовые концентрации, массу вещества в аппарате. Например, ячеечная модель может быть записана как:

$$\frac{dC_{M_i}}{d\tau} = \frac{G}{G_i} (C_{M_i} - C_i), i = 1, \dots, n,$$

где G – массовый расход потока через аппарат, кг/с;

G_i – масса i -й ячейки;

C_{M_i} – массовая концентрация вещества в потоке, кг/кг.

Неизвестные параметры модели определяют исходя из кривых отклика с

использованием метода моментов, метода наименьших квадратов и др.

6.4. Основные характеристики пищевых материалов, как объектов сушки

Создание эффективных конструкций сушильных аппаратов невозможно без учета физико-механических характеристик влажных материалов.

Основные характеристики объединены в пять групп:

- *сорбционно-десорбционные* (изотермы сорбции-десорбции, кривые распределения пор по радиусам), ответственные за внутреннее диффузионное сопротивление в процессе сушки;

- *тепловые* (теплопроводность, температуропроводность, теплоемкость), ответственные за термическое сопротивление высушиванию;

- *гигротермические* (термограммы сушки, теплота смачивания), определяющие виды и энергию связи влаги с материалом;

- *структурно-механические* (адгезионно-когезионные свойства, гранулометрический состав) влияющие на выбор гидродинамического режима сушки;

- *технологические* (допустимая температура нагрева материала, пожаро – и взрывоопасность), обуславливающие выбор способа сушки.

Механизм переноса влаги определяется ее фазовым состоянием и характеристическим размером пор, по которым движется влага. При газообразной фазе возможны следующие механизмы переноса:

- в порах, диаметр которых больше длины свободного пробега молекулы газа (поры с $r > 100 \text{ нм}$), происходит нормальная диффузия по закону Фика;

- если в пористом материале возникают значительные перепады концентрации при большом влагосодержании, то в крупных порах возможно вязкое течение, которое может быть описано уравнением Пуазейля;

- в порах, радиус которых меньше 100 нм, закономерности влагопереноса не подчиняются закону Фика, и при молекулярной диффузии будет наблюдаться соударение молекул со стенками капилляра, а не между собой, как

это происходит при нормальной диффузии.

При нормальном барометрическом давлении и температуре средняя длина свободного пробега молекулы воздуха составляет 64 нм, а молекулы водяного пара – 42 нм. С увеличением температуры длина свободного пробега увеличивается пропорционально росту температуры;

– если радиусы пор близки к радиусу молекулы влаги, то диффузия пара не будет ни молекулярной, ни поверхностной – в этом случае при переносе играют силы отталкивания, которые затрудняют прохождение молекулы в порах. Это требует большой энергии активации.

При жидкой фазе наблюдается капиллярный механизм переноса, протекающий под действием разности капиллярных потенциалов, и механизм пленочного течения жидкости, протекающий на границе раздела сред «твердое тело-жидкость».

Классификация сушильных аппаратов

Для сушки пищевых продуктов, полуфабрикатов и пищевого сырья в отраслях перерабатывающей и пищевой промышленности используются различные конструкции сушильных аппаратов, отличающихся друг от друга рядом классификационных признаков (табл.6.2).

Таблица 6.2.

Классификация сушильных аппаратов

Признак классификации	Тип сушильного аппарата
Давление в рабочем пространстве	Атмосферные Вакуумные Под избыточным давлением
Режим работы	Периодического действия Непрерывного действия
Вид теплоносителя	Воздушные Газовые На насыщенном или перегретом паре На жидких теплоносителях Электромагнитное излучение
Направление движения теплоносителя	Прямоточные Противоточные С перекрестным движением Реверсивные

Циркуляция теплоносителя	Естественная Принудительная
Способ нагрева теплоносителя	Паровой Топочное устройство Электронагрев Комбинированный
Кратность использования теплоносителя	Проходные Рециркуляционные
Способ удаления влаги из аппарата	С теплоносителем С продувкой воздухом Химическое поглощение влаги
Способ подвода тепла к материалу	Конвективный Контактный Радиационный Индукционный Ультразвуковой
Вид высушиваемого материала	Крупно- и мелкодисперсные материалы Пастообразные материалы Жидкие растворы, эмульсии и суспензии
Гидродинамический режим	С неподвижным слоем продукта Со взвешенным слоем (псевдооживление, фонтанирование, завихренный поток) С распылением в потоке теплоносителя
Конструктивное исполнение	Камерные Шахтные Ленточные Барабанные Трубчатые Модульные и др.

На рис. 6.8 в качестве примера приведена схема ленточной сушилки. Конструктивно сушилка представляет собой туннель, в котором установлен ленточный конвейер, на котором помещается высушиваемый материал. Ленточные сушилки могут работать с циркуляцией и промежуточным подогревом воздуха. В качестве агента используется воздух, перегретые газы, радиационное излучение, или перегретый пар.

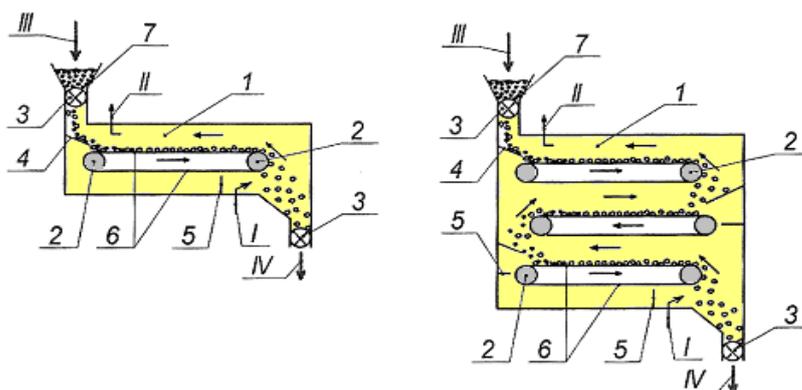


Рис. 6.8. Схема ленточной сушилки:
1 – привод; 2 – каркас; 3 – паропровод; 4 – транспортер; 5 – вытяжка

В зависимости от вида высушиваемого материала конвейер выполняют в виде металлической сетки, перфорированной ленты или отдельных лотков. Ленточные сушилки могут иметь несколько ярусов с установленными в них один над другим отдельными конвейерами. В этом случае высушиваемый продукт передается с конвейера на конвейер. Ленты конвейеров, как правило, расположены в одной общей камере. Каждая лента работает при отдельно заданных гидродинамических и температурных режимах. Для выравнивания влажности материала по высоте слоя над лентами монтируются ворошители.

Интенсивность сушки в ленточных сушилках находится в пределах от 5 до 30 кг/(м² · ч). Ширина лент промышленных сушилок составляет от 1,25 до 2 м, а рабочая площадь 10...120 м².

На рис. 6.9 приведена компоновка барабанной сушилки. По способу подвода тепла барабанные сушилки делятся на сушилки прямого действия (конвективные), контактные и комбинированные. Сушильная камера представляет собой наклонный барабан, вращающийся со скоростью 0,5...8 об/мин. Внутри барабана установлены насадки, обеспечивающие равномерное распределение высушиваемого материала по сечению барабана

На рис. 6.9 приведено устройство малогабаритного сушильного аппарата барабанного типа с инфракрасными нагревателями, в котором реализуются все три основных способа подвода теплоты.

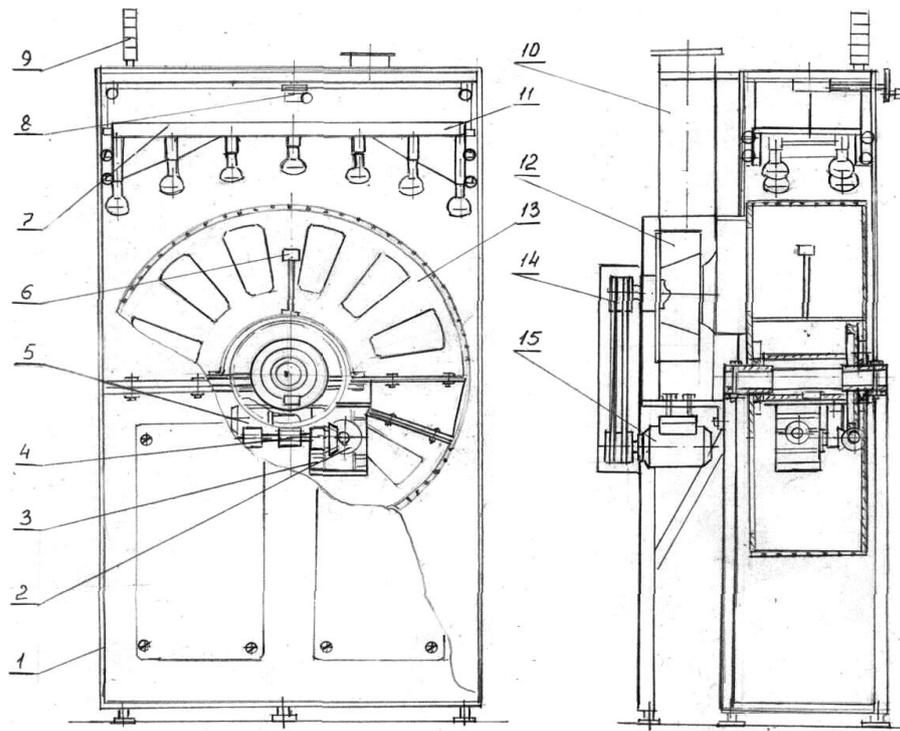


Рис. 6.9. Схема сушилки барабанного типа с инфракрасной нагревательной кареткой:
 1 – каркас; 2 – редуктор; 3 – коническая передача; 4 – червячная передача; 5 двигатель
 привода барабана; 6 – датчик температуры; 7 – каретка; 8 – тросовая система; 9 – плафон; 10
 – патрубок; 11 – траверса каретки; 12 – вентилятор; 13 – барабан перфорированный;
 14 – привод вентилятора; 15 – двигатель

Условные обозначения

D – коэффициент взаимной молекулярной диффузии.

$\partial\rho/\partial n$ – градиент концентрации.

n – направление нормали к поверхности одинаковой концентрации.

k_T – термодиффузионное отношение.

D_T – коэффициент термодиффузии.

$\partial T/\partial n$ – температурный градиент.

μ_i – молекулярные массы.

$\partial p/\partial n$ – градиент давления.

ω – скорость перемещения вещества.

$G_{ж}, G_n$ – плотности потоков жидкости и пара соответственно.

$D_{ж}, D_n$ – коэффициенты диффузии для жидкости и пара соответственно.

ρ_0 – плотность абсолютно сухого материала.

U – влагосодержание.

$\partial u / \partial n$ – градиент влагосодержания.

D_0 – коэффициент диффузии, характеризующий перемещение осмотической влаги.

$D_{кп}$ – коэффициент диффузии, характеризующий перемещение капиллярной влаги в виде пара.

$D_{кж}$ – коэффициент диффузии, характеризующий перемещение капиллярной влаги в виде жидкости.

G_u – плотность общего потока влаги.

δ – термоградиентный коэффициент.

$\partial t / \partial n$ – градиент температуры.

i – энтальпия жидкости.

c_0 – удельная теплоемкость сухого материала.

$\partial u / \partial \tau$ – изменение влагосодержания в элементарном объеме в единицу времени.

Lu – число Лыкова, характеризующее инерционность поля влажности.

Fo – число Фурье, характеризующее гомохронность полей переноса теплоты и массы вещества.

Pn – число Поснова, характеризующее относительный перепад удельного влагосодержания.

w или φ – влажность материала.

p_n – парциальное давление газа.

ψ – коэффициент молекулярного течения, пропорциональный среднему радиусу капилляра.

l – характерный размер поры капилляра.

Δt – перепад температуры в порах капилляра.

R – универсальная газовая постоянная.

μ_n – молекулярная масса пара.

$\frac{d\bar{U}}{d\tau}$ – скорость сушки.

$\nabla\Pi$ – градиент потенциала переноса.

\vec{j}_M – плотность потока массы жидкости.

λ_Σ – суммарный коэффициент диффузии.

C_n – концентрация влаги.

ε – величина, характеризующая способность воздуха поглощать влагу из материала.

Глоссарий

Диффузия – самопроизвольное проникновение одного вещества в другое до момента наступления равновесного состояния.

Молекулярная диффузия – диффузия вследствие теплового движения молекул.

Молярная диффузия – процесс переноса вещества за счет перемешивания.

Концентрационная диффузия – диффузия в смесях с различной концентрацией компонентов, когда каждый компонент перемещается в сторону меньшей концентрации до ее выравнивания.

Термодиффузия – молекулярная диффузия, вызванная неоднородным распределением температуры в смеси.

Массообмен – переход вещества из одной фазы в другую под влиянием молекулярной или молярной диффузии.

Плотность диффузионного потока вещества – количество вещества, диффундирующего в единицу времени через единичную площадку концентрационной поверхности прямо пропорционально градиенту концентраций.

Капиллярно-пористые материалы – материалы, в которых влага связана капиллярными силами.

Коллоидные материалы – материалы с преобладанием осмотической формы связи влаги.

Коллоидные капиллярно-пористые материалы – материалы, содержащие осмотическую и капиллярную жидкость.

Критерий внутреннего испарения (фазового превращения) – коэффициент, учитывающий долю влаги, которая перемещается в виде пара.

Эффузия – процесс независимого перемещения молекул пара и воздуха в микропорах тела зоны испарения.

Тепловое скольжение – явление циркуляции воздуха в капилляре в зоне испарения, направленное против потока теплоты у стенок капилляра и по направлению этого потока по оси капилляра.

Абсолютная влажность – количество водяного пара в 1 м^3 влажного воздуха.

Относительная влажность – величина, характеризующая влагоемкость сушильного агента, т.е. способность воздуха к насыщению парами.

Сорбция – процесс поглощения влаги материалом из окружающей среды.

Десорбция – процесс обратный сорбции.

Хемосорбция – процесс поглощения телом газов или паров с образованием химических соединений.

Контрольные вопросы

1. Что понимается под диффузией веществ, и на какие виды она подразделяется?
2. Что понимается под массообменом, каким образом он протекает и какими явлениями сопровождается?
3. Что понимается под плотностью диффузионного потока вещества, и каким уравнением она выражается?
4. Какие существуют виды связи влаги в материале?
5. На какие группы делятся влажные материалы в зависимости от формы связи влаги?
6. В каком виде записывается основной закон перемещения влаги в коллоидном капиллярно-пористом теле?

7. Каким образом перемещается влага внутри влажного тела при существовании градиента влагосодержания и градиента температуры и их направления?

8. Каков вид дифференциальной системы уравнений, описывающих перемещение теплоты и влаги во влажных материалах?

9. Какие числа подобия выводятся из системы дифференциальных уравнений и граничных условий, характеризующих баланс влаги и баланс теплоты?

10. Какие коэффициенты являются основными при переносе теплоты и вещества во влажных телах?

11. Какие виды диффузионных процессов имеют место в технологиях пищевых производств?

12. Какова роль термовлагопроводности при контактной сушке, когда направление градиентов влагосодержания и температуры совпадает?

13. Какое направление имеют градиенты влагосодержания и температуры при конвективной сушке, и каково выражение суммарного потока влаги?

14. Какие величины входят в основной закон теплопроводности?

15. От каких параметров зависит интенсивность тепло- и массопереноса для случая нагревания материала?

16. Что понимается под влагосодержанием материала?

17. Какими показателями характеризуется влажный воздух как сушильный агент?

18. Что характеризует температура мокрого термометра?

19. При каких условиях возможно испарение влаги из продукта (десорбция), а при каких – поглощение влаги (сорбция)?

20. Какими величинами характеризуется кинетика процессов сушки?

21. При каких условиях состояние системы «влажное тело-газ» является равновесным?

22. К каким процессам относится процесс сушки материалов?

23. Что представляют собой изотермы сорбции-десорбции?

24. В чем состоит сущность теории БЭТ?
25. Какие явления происходят в продуктах в процессе их сушки?
26. Какие условия должны быть учтены при расчете сушильных аппаратов?
27. Какие величины входят тепловой и материальный балансы сушильной камеры?
28. Какие характеристики влажных материалов должны учитываться при создании эффективных конструкций сушильных аппаратов?

Лекция 7. Процессы разделения гетерогенных систем. Мембранные процессы

Вопросы:

1. Основные сведения о процессах разделения гетерогенных систем. Процессы осаждения и фильтрации.
 2. Основные сведения о мембранных процессах.
 3. Устройство мембранных аппаратов.
- Условные обозначения.
- Глоссарий.

7.1. Основные сведения о процессах разделения гетерогенных систем. Процессы осаждения и фильтрации

Во многих отраслях пищевой и перерабатывающей промышленности приходится иметь дело с неоднородными (гетерогенными) системами. Например, такие системы образуются при просеивании сыпучих материалов на мукомольных заводах в виде мучной пыли, при дроблении сахара в виде сахарной пыли, при измельчении зерновых культур и др. На крахмально-паточных заводах при смешивании сыпучих материалов с жидкостями неоднородные системы представляют суспензии в виде крахмального молока, при мойке растительного сырья образуются грязевые суспензии, при прессовании плодов и овощей на консервных заводах образуются соковые

суспензии с частицами мякоти и т.п.

Выше была приведена классификация и свойства неоднородных систем по агрегатному состоянию (см. 2.1). Классификация по размерам частиц, входящих в неоднородные системы, носит условный характер, поскольку дисперсные фазы систем содержат частицы разных размеров. Например, суспензии по эквивалентному диаметру ($d_э$) классифицируются на крупнозернистые с $d_э$ более 1 мм, среднезернистые, у которых $d_э = 100\text{мкм} \dots 1\text{ мм}$, мелкозернистые – $d_э = 5 \dots 100\text{ мкм}$, тонкие – $d_э = 100\text{нм} \dots 5\text{мкм}$, коллоидные $d_э = 1 \dots 100\text{ нм}$. Под эквивалентным диаметром частицы понимается диаметр сферы, объем которой равен объему частицы V из того же материала $d_э = 1,24\sqrt[3]{V}$. К этой классификации можно с некоторым приближением добавить и эмульсии. Например, молоко, у которого размер жировых шариков составляет несколько микрометров, относится к тонким эмульсиям. Сухие пыли условно можно считать мелкозернистыми и тонкими газовыми суспензиями.

В пищевых производствах приходится разделять суспензии и эмульсии на фракции. Методы разделения обуславливаются видом неоднородной системы и состоянием ее фаз, а также зависят от физико-механических свойств среды. Технология разделения определяется требованиями к конечной продукции и требованиями экологии. Например, очистка газов от пыли или обработка мучной или сахарной пыли предусматривает не только использование циклонов, но и фильтрование через матерчатые рукавные или барабанные фильтры.

Известны два основных метода разделения неоднородных систем: осаждение и фильтрация (рис. 7.1).

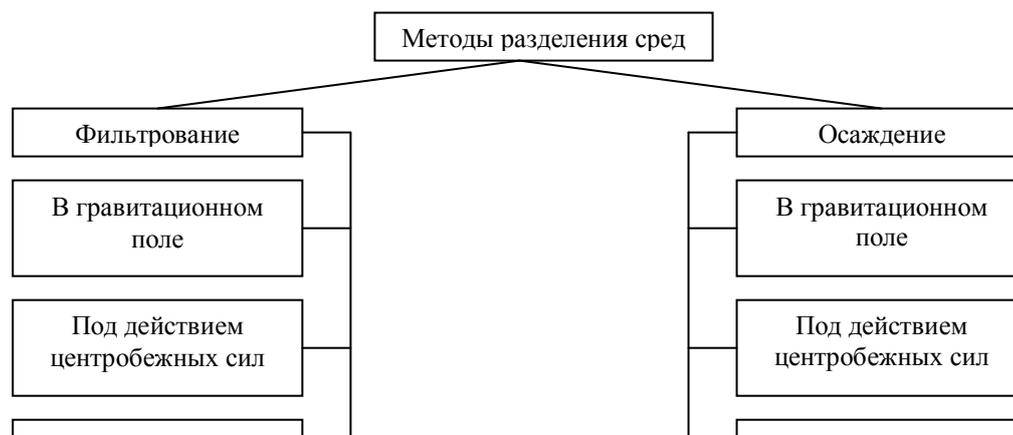


Рис. 7.1. Классификация методов разделения гетерогенных систем

Осаждение. В процессе осаждения частицы движутся относительно сплошной среды. При фильтрации дисперсионная среда пропускается через пористые материалы. Для интенсификации процессов осаждения и фильтрации используются гравитационное, центробежное и электромагнитные поля.

Показателем качества процессов разделения сред является эффект разделения, под которым понимается отношение количества компонента, выделенного из дисперсной фазы, к начальному его количеству в смеси $\eta_p = k_0 / k_H$.

Пример. Определить степень обезжиривания молока, если исходная жирность молока составляла $\eta = 3,8\%$, жирность полученных сливок $\eta_c = 20\%$ и обраты $\eta_o = 0,06\%$.

$$\text{Имеем } \eta_p = \frac{\eta_c (\eta - \eta_o)}{\eta (\eta_c - \eta_o)} 100 = \frac{20 (3,8 - 0,06)}{3,8 (20 - 0,06)} 100 = 94,7\% .$$

Рассмотрим подробнее физические явления, происходящие при осаждении частиц дисперсной фазы суспензии в поле гравитационных сил. Пусть частицы плотностью ρ_1 с характерным эквивалентным диаметром d_3 находятся в жидкой среде, имеющей вязкость μ_c и плотность ρ_c . На отдельную частицу среды будут действовать следующие силы:

- сила тяжести $G = mg$;
- сила выталкивания (сила Архимеда) F_a ;
- центробежная сила $F_c = \omega^2 R$.

Если поместить среду в электромагнитное поле, то появится дополнительная сила $F_{эл}$.

Сумма векторов этих сил даст равнодействующую $\bar{F} = \bar{G} + \bar{F}_a + \bar{F}_c + \bar{F}_{эл}$. Если $\bar{F} \neq 0$, то частица будет перемещаться с какой-то определенной скоростью осаждения. При этом возникнет еще одна сила, которая будет препятствовать перемещению частицы – это сила сопротивления среды \bar{R} , зависящая от вязкости среды и направленная в сторону противоположную движению частицы.

Осаждение под действием центробежных сил широко используется в циклонах и центрифугах.

В циклоне (рис. 7.2) запыленный газовый поток вводится в цилиндрическую часть аппарата по касательной с большой скоростью. Вследствие такого ввода поток начинает вращаться, и частицы под действием центробежной силы отбрасываются к стенкам циклона и перемещаются по спирали в бункер.

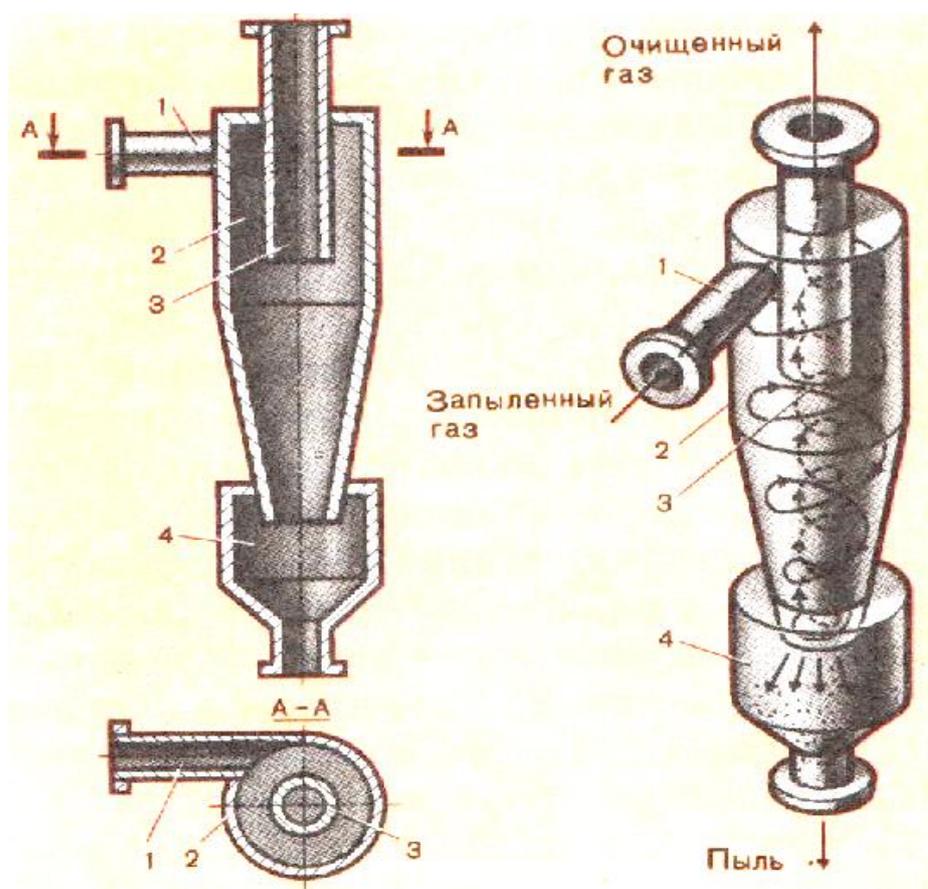


Рис. 7.2. Схема центробежного пылеуловителя – циклона:
1 – патрубок ввода запыленного воздуха, 2 – цилиндрический корпус, 3 – патрубок для вывода очищенного воздуха, 4 – бункер для частиц

Для осаждения эмульсий и суспензий используются устройства, называемые центрифугами, и сама операция называется центрифугованием.

Для центрифуг фактором разделения является отношение центробежной силы к силе тяжести $\eta_p = \omega^2 R / g$, где R - радиус барабана центрифуги. В зависимости от значения фактора разделения различают нормальные центрифуги ($\eta_p < 3000$) и сверхцентрифуги ($\eta_p > 3000$).

На рис. 7.3 приведена схема центрифуги периодического действия

Фильтрование. Рабочим органом аппаратов для фильтрования является фильтр, представляющий собой пористое тело, способное пропускать сквозь себя фильтрат и задерживать твердые частицы. В качестве фильтрующего материала используют мелкоячеистые сита, ткани, сыпучие материалы и др. При фильтровании частицы в зависимости от их размера могут проходить через поры фильтра или задерживаться ими, поэтому процесс фильтрования может быть с образованием осадка, когда частицы проходят через поры фильтра; с частичным закупориванием пор и с полным закупориванием пор.

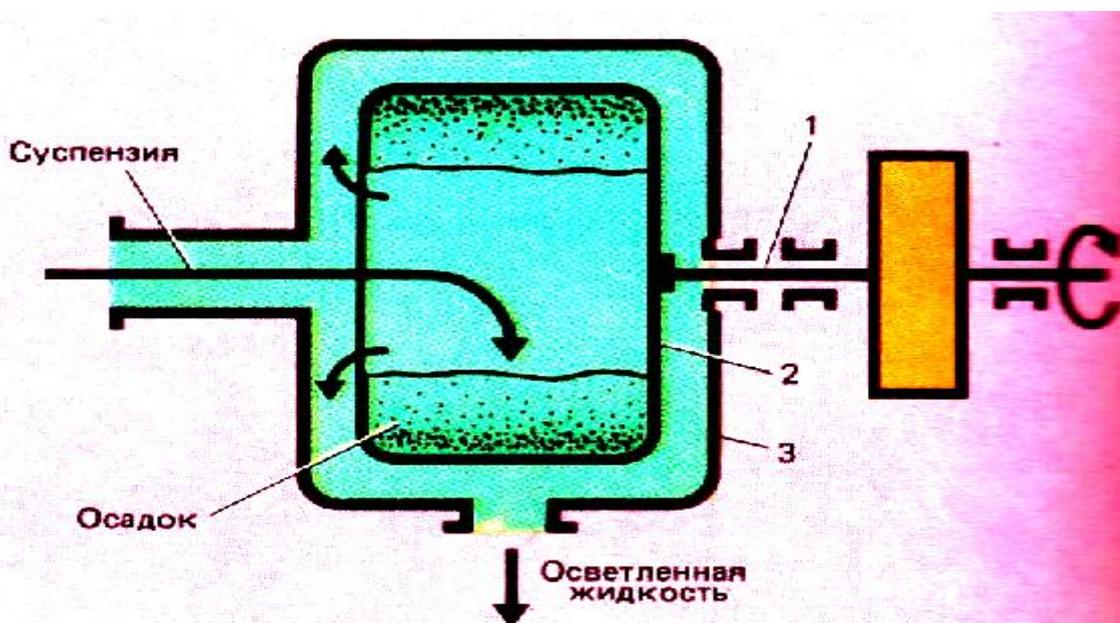


Рис. 7.3. Центрифуга периодического действия:
1 – вал, 2 – барабан, 3 - кожух

Фильтр оказывает сопротивление движению жидкости, поэтому в фильтрах с помощью насосов или другими средствами создают перепад давлений, чтобы ускорить процесс фильтрации.

Показателем интенсивности процесса фильтрации является скорость фильтрования, равная количеству фильтрата, проходящего через единицу поверхности фильтра в единицу времени:

$$\omega_{\phi} = \frac{dv_{\phi}}{d\tau_{\phi}},$$

где v_{ϕ} – объем фильтрата, отнесенный к поверхности фильтра;

τ_{ϕ} – время фильтрования.

Процесс фильтрования может осуществляться при постоянном давлении или при постоянной скорости. Скорость фильтрования зависит от физико-механических свойств суспензии, характеристик осадка, свойств фильтра и других факторов.

На рис. 7.4. приведено устройство барабанного вакуум-фильтра, служащего для фильтрования суспензий. Вакуум-фильтр представляет собой барабан, покрытый сверху фильтровальной тканью. Перегородки, находящиеся внутри барабана, делят его на изолированные друг от друга камеры, которые при вращении барабана поочередно стыкуются с трубами. Благодаря этому на фильтре одновременно происходят несколько процессов: фильтрование, подсушивание и промывка осадка.

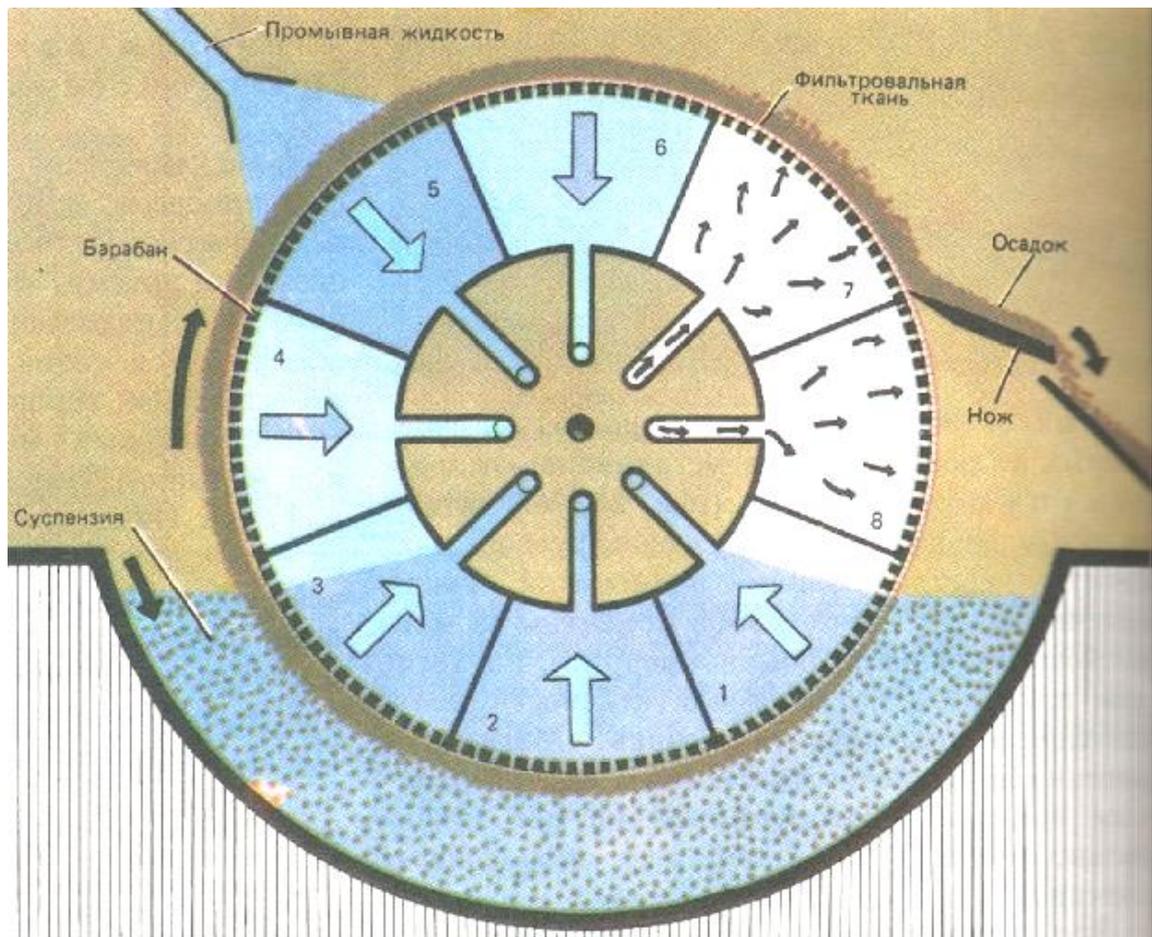


Рис. 7.4. Схема барабанного вакуум-фильтра

Сжатый воздух, как видно из рис. 7.4, подведен к камерам 7 и 8, а остальные находятся под вакуумом. В камерах 1, 2 и 3 фильтруется суспензия. Под действием вакуума фильтрат проходит через фильтровальную ткань и отверстия в барабане и выводится по трубам из аппарата, а осадок откладывается на ткани. В камере 4 осадок предварительно подсушивается, в камере 5 промывается и в камере 6 вновь подсушивается. Камера 7 стыкуется с трубой, в которой находится сжатый воздух, который служит для разрыхления осадка. В камере 8 осуществляется очистка ткани от остатков частиц.

При установлении закономерностей процесса фильтрации исходят из двух основных уравнений:

– уравнения расхода $dV_{\phi} / d\tau_{\phi} = \omega f z$;

$$- \text{уравнения перепада давления } \Delta p = \lambda \frac{l}{d_3} \rho_\phi \frac{\omega^2}{2},$$

где ω – скорость течения жидкости в капиллярах;

f – сечение пор;

z – число капилляров фильтра;

d_3 – эквивалентный диаметр капилляра;

l – длина капилляра;

ρ_ϕ – плотность фильтрата;

λ – коэффициент трения.

7.2. Основные сведения о мембранных процессах

Мембранные процессы относятся к массообменным процессам, и, несмотря на то, что эти процессы существуют в природе и биологических системах многие миллионы лет, в пищевых и химических технологиях они начали использоваться относительно недавно.

Полупроницаемая мембрана (перепонка, кожица) пропускает одни вещества и задерживает другие.

Схема мембранного процесса приведена на рис. 7.5.

В 1748г аббат А.Нолле, перегородив воду и спирт пленкой из бычьего пузыря, заметил, что вода проникает через эту преграду и смешивается со спиртом.

Данное явление получило название *осмос*, что означает *давление*, поскольку движущей силой для проникновения воды через мембрану является осмотическое давление. Это давление проявляется только тогда, когда чистую воду и водный раствор разделить полупроницаемой мембраной, которая задерживает молекулы растворенного вещества и пропускает молекулы воды.

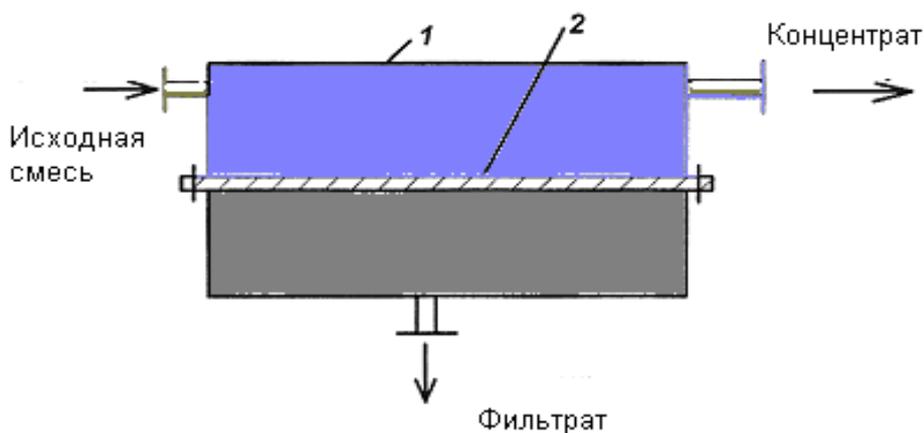


Рис. 7.5. Схема мембранного процесса
1 – корпус, 2 - мембрана

Чистая вода станет протекать через мембрану в раствор (рис.7.6), и остановить это течение можно, если приложить к раствору давление, равное по величине осмотическому давлению. Если к раствору приложить давление больше осмотического, то вода пойдет в обратном направлении из раствора. Для осмотического разделения требуется очень мало энергии

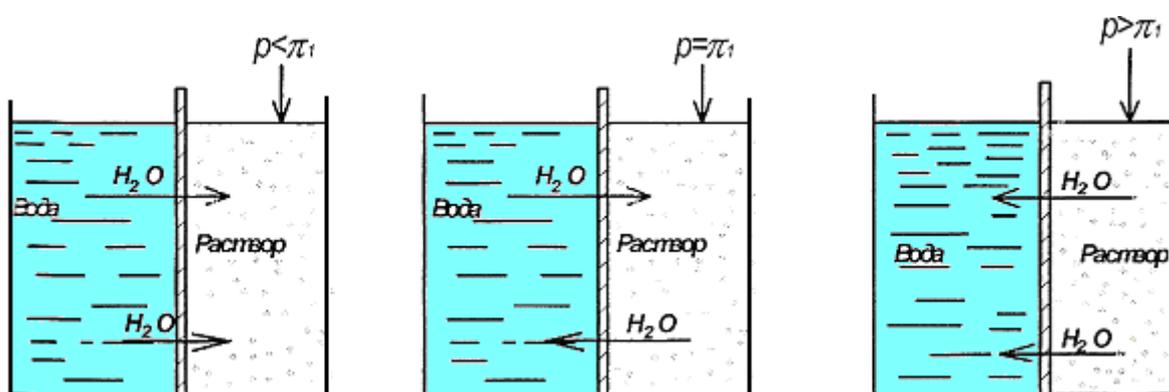


Рис. 7.6. Схема движения молекул воды под действием давления
(π_1 - осмотическое давление)

К мембранным процессам обработки жидких и газообразных сред относят следующие:

- ультрафильтрацию;
- обратный осмос;
- электродиализ;
- диализ;
- диффузионное разделение.

Сущность мембранных процессов заключается в разделении и концентрировании жидкостей в процессе фильтрации через специальные мембраны под действием давления (ультрафильтрация и осмос) или электромагнитного поля (электродиализ). Метод диффузионного разделения основан на различии скоростей диффузии газов через мембрану.

Так, например, ультрафильтрация в молочных производствах используется для выделения белков из молока и молочной сыворотки. При обратном осмосе происходит повышение концентрации молока содержащего сырья, поскольку через мембрану проходит только вода. С помощью электродиализа осуществляется деминерализация жидкостей, например, молочной сыворотки.

Основными объектами биотехнологических производств являются ферменты, с помощью которых получают ферментные препараты или какие-либо полезные продукты с помощью ферментных препаратов. Особенностью этих производств, несмотря на различие технологий и аппаратного оформления, является организация и функционирование непрерывного биотехнологического потока преобразования исходного сырья в целевой продукт с заданными свойствами.

Операторные модели ферментных производств позволяют выделить общие технологические признаки. Так, в этих производствах преобладают процессы разделения жидких смесей, а среди объектов разделения доминируют ферментные системы и основные потери ферментативной активности происходят именно на стадии разделения ферментных систем.

Одним из наиболее эффективных способов разделения ферментных систем являются мембранные процессы, обеспечивающие следующие преимущества перед другими способами:

- возможность глубокого концентрирования ферментов (в 20 и более раз);
- возможность полной очистки ферментов от низко и высокомолекулярных соединений;
- возможность разделения сред при пониженных температурах;

- неизменность pH;
- безреагентность;
- осуществление процессов в асептических и герметичных условиях.

В качестве примера на рис. 7.7 приведено строение системы мембранного разделения ферментных смесей.

Подсистема А представляет собой объект разделения – ферментную смесь, подсистема Б – устройство, включающее мембранный барьер, через который осуществляется трансмембранный массоперенос в процессе разделения. Взаимные связи между подсистемами определяют качество контактов, которые обеспечиваются техническими параметрами технологического оборудования. Обе подсистемы являются централизованными, поскольку в каждой из них ведущую роль играет один из системообразующих элементов: в одной – ферменты, в другой – мембрана.

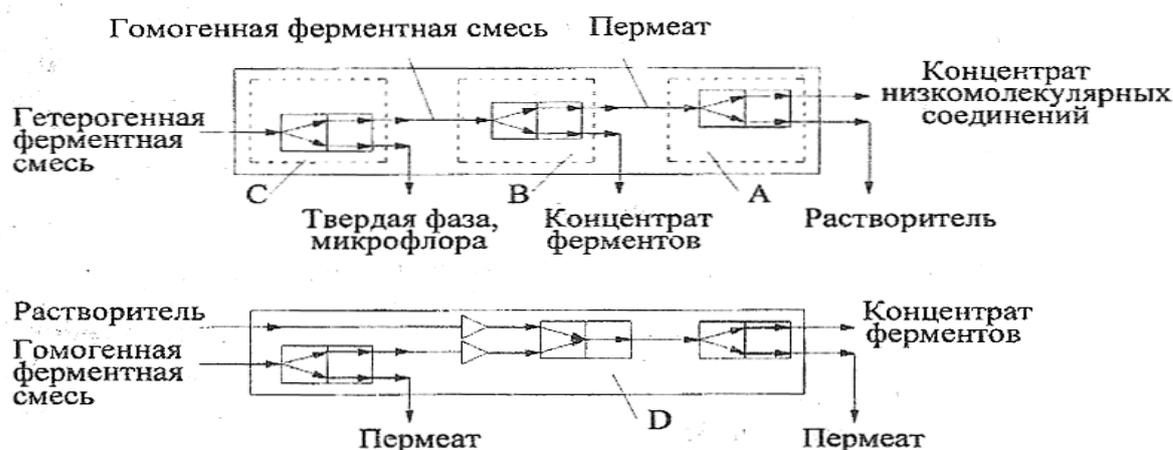
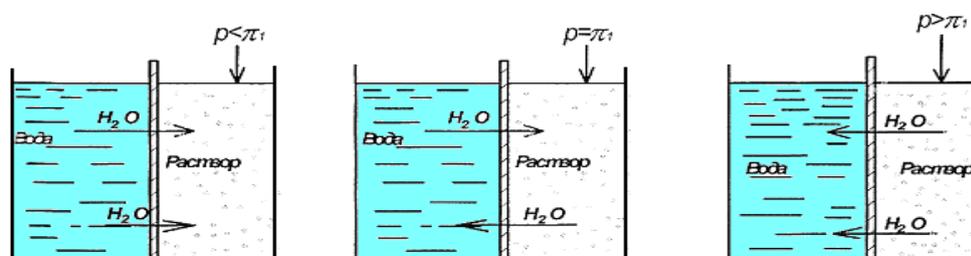


Рис. 7.7. Модель системы типового процесса мембранного разделения ферментисодержащих сред



На рис. 7.8. приведена схема селективной проницаемости мембран при разделении ферментных систем на примере ультраfiltrации.

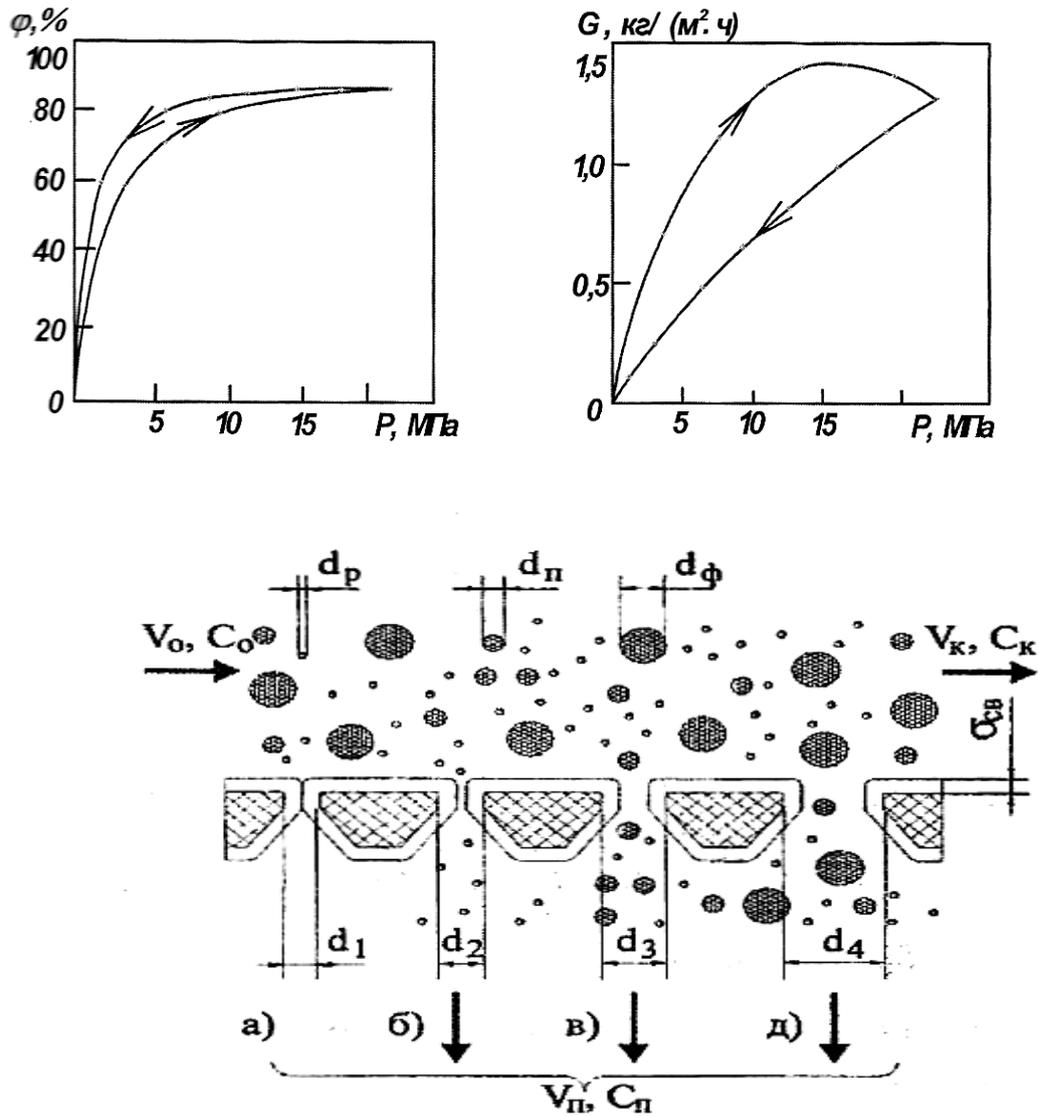


Рис.7.9. Схема механизма проницаемости мембраны

В этой модели предполагается, что существенное влияние на сепарационные характеристики мембраны оказывает слой жидкости, образующийся при контакте раствора с мембраной, как на ее поверхности, так и в ее порах. Примембранный слой может быть непроницаем для веществ, которые не растворяются в жидкости, поэтому некоторые ферменты могут задерживаться мембраной несмотря на то, что размеры молекул будут меньше диаметра пор. Снижение пропускной способности может быть связано наличием влаги в порах, вызывающих уменьшение сечения пор. Одни поры (а) могут быть полностью блокированы слоем влаги, другие будут пропускать

только молекулы растворителя (б), третьи - молекулы растворителя и низкомолекулярных примесей (в), четвертые – молекулы ферментов.

Трансмембранный массоперенос при разделении ферментных смесей сопровождается концентрационной поляризацией, оказывающей негативное влияние на устойчивость мембранных систем. На рис. 7.10. приведена схема мембранного разделения ферментной смеси с учетом концентрационной поляризации при установившемся режиме.

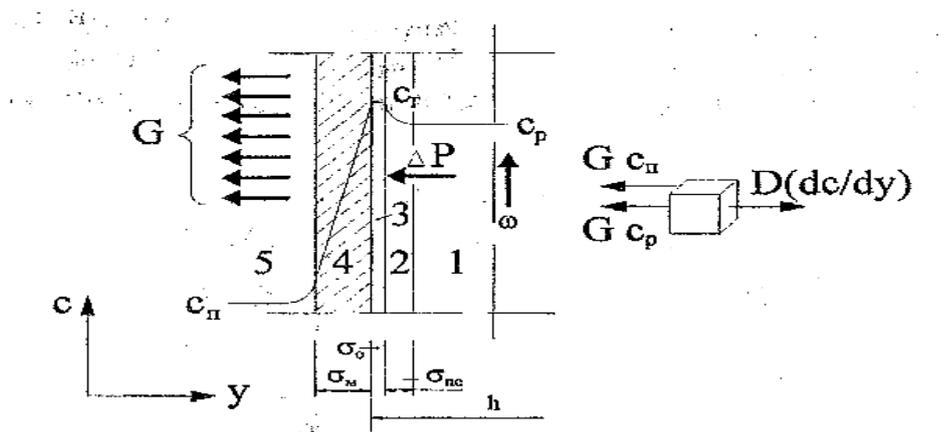


Рис.7.10. Схема потоков и распределение концентраций при мембранном разделении ферментных смесей:

1 – поток разделяемой смеси; 2 – пограничный слой; 3 – гелевый слой; 4 – мембрана; 5 – пермеат

Для высокоселективных мембран концентрационная поляризация может быть представлена выражением $C_T/C_p = \exp(G\delta_{nc}/D)$, где G - удельная пропускная способность мембраны, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; δ_{nc} - толщина пограничного слоя у поверхности мембраны со стороны раствора, м ; D - коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$.

Повышение устойчивости мембранных систем может быть достигнуто:

- применением мембран с невысокой пропускной способностью;
- функционированием при повышенной температуре;
- уменьшением толщины мембранного канала;
- интенсификацией гидродинамических условий у поверхности мембраны.

Установлено, что при ультрафильтрации ферментных систем производительность мембран линейно возрастает при повышении рабочего

давления до 0,4 МПа, затем рост производительности замедляется и при давлении более 0,6 МПа – снижается. С увеличением температуры производительность полимерных мембран также возрастает линейно (рис. 7.11.).

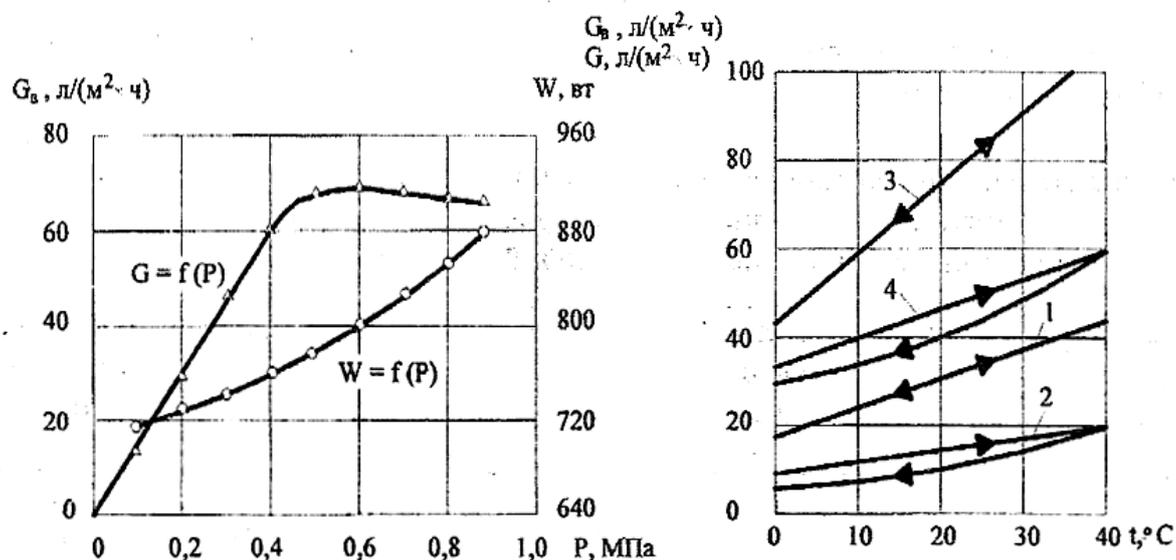


Рис. 7.11. Влияние давления и температуры на работу мембранных систем

По сравнению с традиционными методами, применяемыми в ферментных производствах (сепарированием и фильтрованием) более высокую эффективность очистки от микрофлоры и тонких взвесей обеспечивает использование микрофильтрационных мембран.

Рабочим органом аппарата для фильтрации и обратного осмоса является полунепроницаемая мембрана, изготавливаемая из ацетата целлюлозы и пористых полимерных материалов. Размеры пор мембраны для ультрафильтрации составляют от 500 до 100 нм. Процесс осуществляется при рабочем давлении от 0,1 до 0,5 МПа.

Размер пор при обратном осмосе составляет 50 нм, а давление – 1...10 МПа.

Рабочим органом аппарата для фильтрации и обратного осмоса является полунепроницаемая мембрана, изготавливаемая из ацетата целлюлозы и пористых полимерных материалов. Размеры пор мембраны для

ультрафильтрации составляют от 500 до 100 нм. Процесс осуществляется при рабочем давлении от 0,1 до 05 МПа.

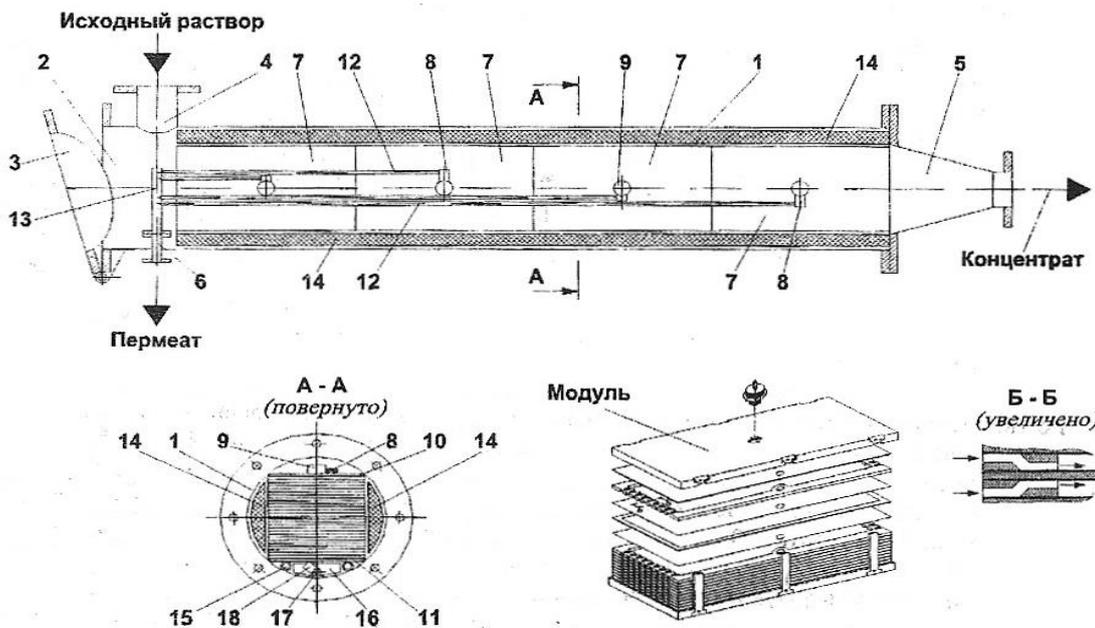
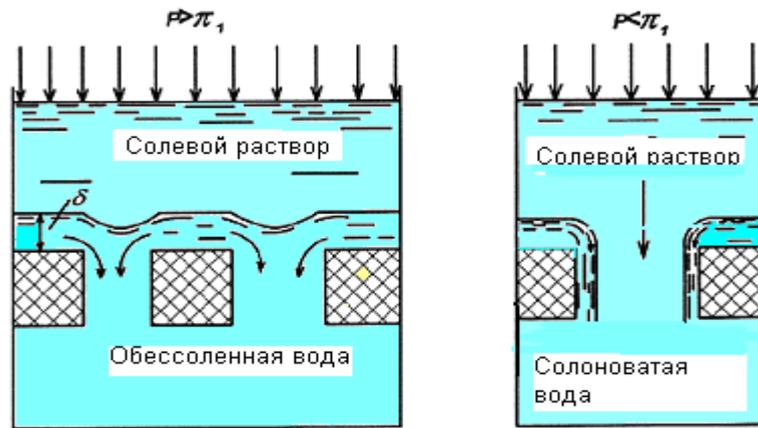
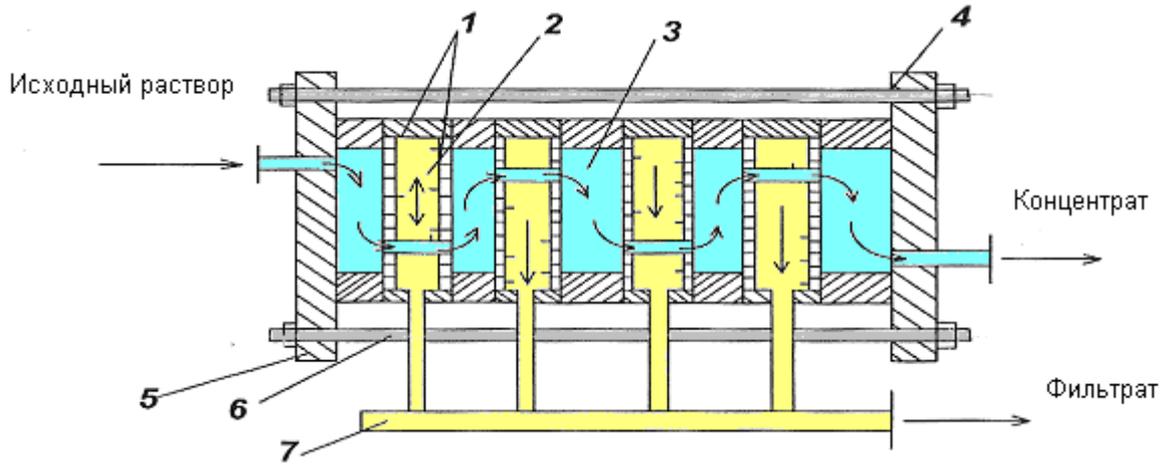


Рис. 7.12. Схема мембранного аппарата

Типовой мембранный аппарат представляет собой устройство, содержащее корпус, мембраны, дренажный узел, элементы ввода исходного продукта и вывода концентрата и фильтрата, перемешивающие устройства (рис. 7.12.).

Для мембранного разделения жидких продуктов используют плоскостные, трубчатые и рулонные аппараты, а также аппараты с полыми волокнами и др. На рис. 7.13. приведены варианты исполнений мембранных аппаратов.

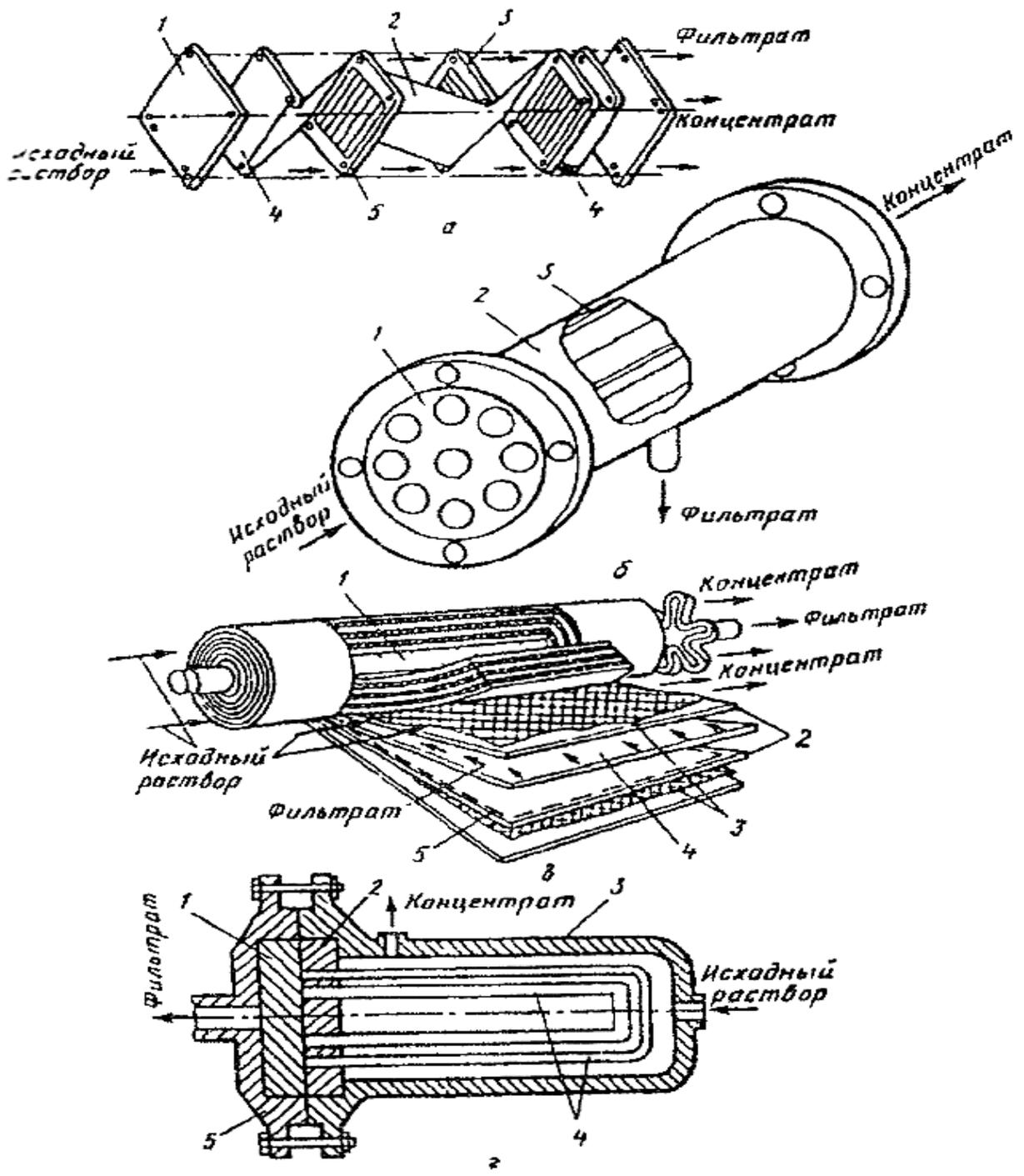


Рис.7.13. Схемы конструктивных исполнений мембранных аппаратов:
 а) плоскорамный вариант: 1 – фланец; 2 – мембрана; 3 – дренажная пластина;
 4 – уплотнитель; 5 – разделитель,
 б) трубчатый вариант: 1 – герметик; 2 – корпус; 3 – мембрана,
 в) рулонный вариант: 1 – трубка отвода фильтрата; 2 – мембрана; 3 – турбулизатор;
 4 – дренажная подложка; 5 - прокладка клеевая,
 г) вариант с полыми волокнами: 1 – дренажная подложка; 2 – шайба; 3 – корпус;
 4 – полая волоконная трубка; 5 – фланец

Условные обозначения:

G – удельная пропускная способность мембран.

δ_{nc} – толщина пограничного слоя у поверхности мембраны.

D – коэффициент диффузии.

C_0, V_0 – концентрация и скорость движения исходного раствора.

C_k, V_k – концентрация и скорость концентрата.

C_n, V_n – концентрация и скорость пермеата.

Глоссарий

Концентрат – продукт, получаемый из исходного раствора после мембранного разделения.

Пермеат – фракция, оставшаяся после выделения концентрата из исходного раствора.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авроров Г.В., Ловцева В.В., Авроров В.А., Тутов Н.Д. Анализ и моделирование операций обработки сырья и полуфабрикатов для мучных кондитерских изделий. Монография. – Старый Оскол: ТНТ, 2015. – 244с.
2. Авроров В.А., Тутов Н.Д. Основы реологии пищевых продуктов. Учебное пособие. – Старый Оскол: ТНТ, 2015. – 268 с.
3. Авроров В.А., Тутов Н.Д., Ловцева В.В. Основы проведения научных исследований. Организация и планирование эксперимента. Монография. – Старый Оскол: ТНТ, 2017. – 492с.
4. Азаров Б.М. и др. Технологическое оборудование пищевых производств. – М: Агропромиздат, 1988. – 463с.
5. Акулич И.Л. Математическое программирование в примерах и задачах. – М: Высшая школа, 1986.
6. Аминов М.С. и др. Технологическое оборудование консервных заводов. – М: Пищ. пром-ть, 1986. – 319с.
7. Андреев В.Г. и др. Лабораторный практикум по технологическому оборудованию пищевых производств. – М: МТИПП, 1990. – 79с.
8. Валентас К.Дж., Ротштейн Э., Сингх Р.П. Пищевая инженерия. Справочник с примерами расчетов. – СПб: Профессия, 2004.
9. Гребенюк С.Н. Технологическое оборудование сахарных заводов. – М: Легпищепром, 1983. – 342с.
10. Г.Корн, Т.Корн. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Изд. 5-е. – М: Наука, 1984. – 831с.
11. Кремер Н.Ш. Исследование операций в экономике. Учебное пособие. – М: ЮНИТИ, 2005.
12. Кретов И.Т. и др. Технологическое оборудование предприятий пищевого концентратной промышленности. – Воронеж: Изд. Воронеж. ун-та, 1996. – 448с.
13. Курочкин А.А. и др. Машины и аппараты для переработки молока. – Пенза:

ПГТА, 2008. – 295с.

14. Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология: концепции, методы, приложения. – СПб: Профессия, 2007.

15. Моудер Дж., Элмаграби С. Исследование операций. В 2-х кн. – М: Мир, 1981.

16. Остриков А.Н. и др. Экструзия в пищевой технологии. – СПб: ГИОРД, 2004. – 288с.

17. Остриков А.Н. и др. Практикум по курсу технологическое оборудование. – Воронеж, ВГТА, 1999. – 424с.

18. Плаксин Ю.М., Малахов Н.Н., Ларин В.А. Процессы и аппараты пищевых производств. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: КолосС, 2008. – 760 с.

19. Система научного инженерного обеспечения пищевых и перерабатывающих отраслей АПК России/А.Н.Богатырев и др. – М: Пищевая промышленность, 1995. – 528с.

20 Фатыхов Ю.А., Канопка Л. Экструзионные технологии пищевых производств. – Вильнюс: Техника, 2007. – 88с.

21. Федоренко Б.Н. Научное обеспечение процессов мембранного ферментов. Автореферат дис. д.т.н. – М: 2002.

22. Фейнман Р. И др. Фейнмановские лекции по физике. т.7. Физика сплошных сред. – М: Мир, 1977. – 288с.

23. Флауменбаум Б.Л. Теоретические основы стерилизации консервов. – Киев: Высшая школа, 1981. – 196с.