

Н. И. ПИЛИПЕНКО, Л. Ф. ПЕЛЕВИНА

ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ

УЧЕБНИК

*Допущено
Экспертным советом
по профессиональному образованию в качестве учебника
для использования в учебном процессе образовательных учреждений,
реализующих программы среднего профессионального образования*



Москва
Издательский центр «Академия»
2008

УДК 641.544.8(075.32)

ББК 36.81-5я723

П324

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор Санкт-Петербургского государственного университета низкотемпературных и пищевых технологий *Е. И. Верболоз*;

кандидат технических наук, преподаватель Московского технического колледжа *А. Н. Голицын*

Пилипенко Н. И.

П324 Процессы и аппараты : учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / Н. И. Пилипенко, Л. Ф. Пелевина. — М. : Издательский центр «Академия», 2008. — 336 с.

ISBN 978-5-7695-4333-3

Рассмотрены механические, гидромеханические, тепловые и массо-обменные процессы. Изложена теория каждого процесса, его статика и кинетика: равновесные соотношения рассматриваемой системы в виде балансов и механизма процесса, а также наиболее распространенные конструкции оборудования (аппаратов) предприятий общественного питания. Представлены методы расчета оборудования с возможными решениями по интенсификации процессов, тесно связанных со сбережением энергоресурсов, разработкой безотходных и малоотходных пищевых производств, в том числе экологически чистых.

Для студентов образовательных учреждений среднего профессионального образования.

УДК 641.544.8(075.32)

ББК 36.81-5я723

Оригинал-макет данного издания является собственностью Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом без согласия правообладателя запрещается

© Пилипенко Н. И., Пелевина Л. Ф., 2008

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2008

ISBN 978-5-7695-4333-3 © Оформление. Издательский центр «Академия», 2008

Введение	3
Глава 1. Основные положения и научные основы дисциплины «Процессы и аппараты»	6
1.1. Общие законы пищевой технологии и положения теории подобия	6
1.2. Свойства сырья, продуктов и полуфабрикатов	11
1.3. Основы рационального построения аппаратов	16
Глава 2. Механические процессы	19
2.1. Измельчение	19
2.2. Сортирование	28
2.3. Обработка материалов давлением (прессование)	37
Глава 3. Гидромеханические процессы	52
3.1. Основы гидравлики	52
3.1.1. Гидростатика	52
3.1.2. Гидродинамика	60
3.2. Перемещение жидкости и газов	72
3.2.1. Насосы	72
3.2.2. Компрессоры	86
3.2.3. Вентиляторы	91
3.3. Разделение жидких и газовых неоднородных систем	93
3.3.1. Осаждение	94
3.3.2. Фильтрование	105
3.3.3. Флотация	122
3.3.4. Очистка воздуха и промышленных газов	123
3.4. Перемешивание и смешивание. Псевдоожижение	132
3.4.1. Перемешивание в жидкой среде	133
3.4.2. Смешивание сыпучих материалов	144
3.4.3. Перемешивание пластических материалов	145
3.4.4. Псевдоожижение	146
Глава 4. Тепловые процессы и аппараты	150
4.1. Основы теплопередачи	150
4.2. Нагревание и охлаждение	164
4.3. Выпаривание	182
4.4. Конденсация	197
4.5. Холодильные процессы	203

Глава 5. Массообменные процессы и аппараты	217
5.1. Теоретические основы процессов массопередачи	217
5.2. Абсорбция	227
5.3. Адсорбция	240
5.4. Перегонка и ректификация	251
5.5. Экстракция	276
5.6. Сушка	285
5.7. Кристаллизация	318
Список литературы	327

Для грамотной эксплуатации современного оборудования на предприятиях пищевой промышленности и общественного питания необходимо:

глубокое *понимание* сущности механических, гидромеханических, тепловых и массообменных процессов;

знание теории каждого процесса, его статики и кинетики, а именно: равновесного соотношения рассматриваемой системы в виде балансов и механизма процесса, т. е. развитие его во времени;

знание наиболее распространенных конструкций пищевых аппаратов;

умение проводить расчеты процессов и аппаратов.

В основе теории процессов и аппаратов, в которых происходят эти процессы, лежит принцип аналогии процессов обмена механическими и гидромеханическими импульсами, теплотой и массой.

Закономерная и последовательная смена состояний в системе, приводящая к возникновению в ней новых свойств, называется *процессом* (лат. *processus* — продвижение).

Устройство, в котором происходит определенный процесс, называется *аппаратом* (лат. *apparatus* — оборудование).

В настоящее время учение о процессах и аппаратах базируется на достижениях таких наук, как физика, математика, химия, отдельных технических наук и экономических дисциплин.

В практической деятельности полученные знания позволяют специалисту успешно решать стоящие перед ним задачи по реализации прогрессивных технологий и обоснованному выбору наиболее эффективных видов оборудования.

Процессы и аппараты пищевых производств тесно связаны с пищевой технологией.

Под пищевой технологией понимается совокупность приемов и способов переработки сырья, изготовления полуфабрикатов, продукции и др.

Издревле люди изобретали и совершенствовали способы и средства обработки пищевого сырья в целях получения готовой продукции. В Средние века уже были известны такие процессы, как приготовление сыра, сушка овощей, фильтрование воды, вино-

делие, выпечка и другие, для проведения которых использовались первые аппараты.

Наука о процессах и аппаратах возникла в начале XIX в. С созданием новых способов обработки сырья получила толчок к развитию и наука о процессах и аппаратах. Первым, кто в России изложил принципы построения курса процессов и аппаратов, был Д. И. Менделеев. В своей книге «Основы фабрично-заводской промышленности», выпущенной в 1897 г., он дал классификацию процессов химической технологии. Его идеи были развиты известными учеными-инженерами А. К. Крупским (Петербургский технологический институт) и И. А. Тищенко, бывшего в 1911—1913 гг. профессором Московского высшего технического училища.

В 1909 г. А. К. Крупский в своем труде «Начальные главы учения и проектирования в химической технологии» изложил основные идеи науки о процессах и аппаратах.

И. А. Тищенко — крупный специалист в области технологии сахара, известный своими работами по расчету многокорпусных выпарных установок, стал первым ректором Московского химико-технологического института (МХТИ) им. Д. И. Менделеева. Широко известность получили труды академика Д. П. Коновалова — выдающегося ученого в области физической химии растворов. В 1915 г. в Петербургском технологическом институте профессор Л. Ф. Фокин стал читать новый курс «Методы и орудия химической техники». Позднее он опубликовал две части курса в виде монографий «Обработка газов» (1923 г.) и «Обработка жидкостей» (1925 г.). Это были первые издания по курсу, который впоследствии стал называться «Процессы и аппараты».

Дальнейшее развитие курса продолжили такие видные ученые, как Н. М. Жаворонков, А. Г. Касаткин, Н. И. Гельперин, В. В. Кафаров, А. Н. Плановский, А. М. Кутепов, В. Н. Стабников и др.

Процессы и аппараты химической и пищевой технологии не имеют принципиального различия. Тем не менее ряд процессов и аппаратов пищевого производства имеют особенности в методиках расчета, в том числе в конструкциях аппаратов и машин.

В 1923 г. профессор Киевского политехнического института А. А. Киров издал учебник по курсу «Аппаратура и основные процессы химической технологии», большая часть которого была посвящена теории перегонки в спиртовой промышленности. В области расчета выпарных и теплообменных установок можно отметить работы профессоров М. А. Кичигина и Г. Н. Костенко, в области сушки — академика А. В. Лыкова, профессора А. С. Гинзбурга, в области экстракции — профессора П. М. Силина, в области кристаллизации — профессора В. Д. Попова.

Существенный вклад в развитие науки о процессах и аппаратах внесли зарубежные ученые В. Уокер, В. К. Льюис, В. Х. Мак-Адамс, издавшие в 1923 г. монографию «Принципы химической техники».

Наибольшее развитие наука о процессах и аппаратах получила во второй половине XX в. Новые открытия в науке и технике, в том числе такие, как возможность использования в технологии приготовления пищи инфра-красного (ИК) излучения и сверх-высококачастотной (СВЧ) энергии привели к созданию соответствующих аппаратов, без которых трудно представить сегодня работу предприятий общественного питания и пищевой промышленности. Несомненно, что привлечение в пищевую отрасль развивающихся нанотехнологий придаст очередной импульс дальнейшему развитию науки о процессах и аппаратах.

Предназначенная играть на современном этапе ведущую роль в интенсификации развития пищевого и в смежных областях промышленного производства наука о процессах и аппаратах должна во многом способствовать насущной проблеме по обеспечению населения продуктами питания.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ДИСЦИПЛИНЫ «ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ»

1.1. Общие законы пищевой технологии и положения теории подобия

При изучении процессов пищевой технологии необходимо выделить основные законы (рис. 1.1), на которых базируется теория конкретного процесса.

Закон сохранения массы и закон сохранения энергии в системе. Данные законы в науке о процессах и аппаратах играют основную роль. Они устанавливают, что в природе и технике имеют место только такие превращения, при которых масса и энергия внутри системы остаются неизменными.

На основании закона сохранения материи (массы) составляют материальный баланс, следуя принципу:

приход материала = расход материала.

Рассмотрим технологический процесс, протекающий в аппарате.

В аппарат поступают компоненты A , B , C в количестве M_A , M_B , M_C ; из аппарата выходят компонент D в количестве M_D и компонент E , как отход производства, в количестве M_E (рис. 1.2).

На основе закона сохранения материи можно записать:

$$M_A + M_B + M_C = M_D + M_E, \quad (1.1)$$

или

$$\sum M_{\text{вх}} = \sum M_{\text{вых}},$$

где $\sum M_{\text{вх}}$ — масса, поступающая в аппарат с исходными компонентами; $\sum M_{\text{вых}}$ — масса, уходящая из аппарата с учетом отходов производства.

Уравнение (1.1) является *уравнением материального баланса*.

На основании материального баланса определяют выход продукта, т.е. выраженное в процентах отношение полученного количества продукта к максимально возможному. Выход продукта рассчитывают на единицу затраченного на его изготовление сырья.

Каждый компонент, входящий в аппарат или выходящий из него, является носителем определенного количества энергии. Эта энергия выражается в тепловых единицах, например джоулях (Дж).

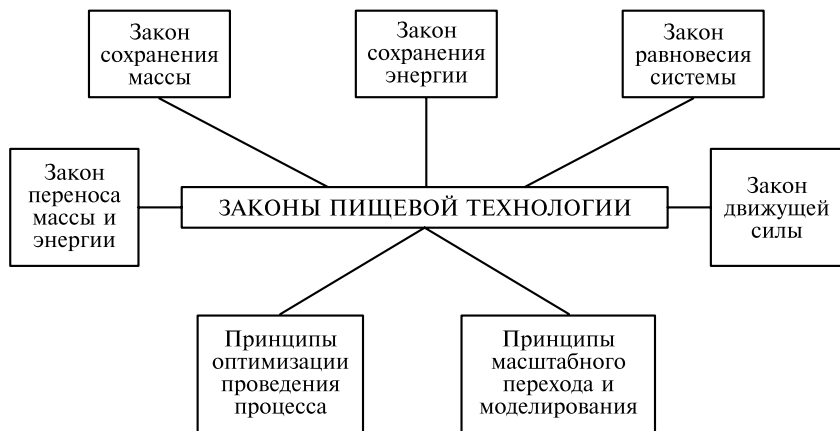


Рис. 1.1. Классификация основных законов пищевой технологии

Кроме того, в аппарат может быть введена энергия извне $Q_{\text{доп}}$, например путем электрического нагревания. Причем при протекании процесса часть энергии в виде тепловых потерь $Q_{\text{пот}}$ теряется в окружающую среду.

На основании закона сохранения энергии составляют *уравнение теплового баланса*. Запишем это уравнение для аппарата (рис. 1.3):

$$Q_A + Q_B + Q_C + Q_{\text{доп}} = Q_D + Q_E + Q_{\text{пот}}, \quad (1.2)$$

$$\sum Q_{\text{вх}} + Q_{\text{доп}} = \sum Q_{\text{вых}} + Q_{\text{пот}},$$

где $\sum Q_{\text{вх}}$ — теплота, поступающая в аппарат с исходными компонентами, Дж; $Q_{\text{доп}}$ — дополнительная теплота, подводимая к аппарату от внешних источников (например, с помощью электрического нагревания), Дж; $\sum Q_{\text{вых}}$ — теплота, уходящая из аппарата, Дж.

Уравнения материального и теплового балансов лежат в основе любого технологического процесса.

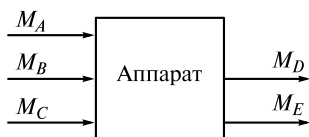


Рис. 1.2. К составлению уравнения материального баланса

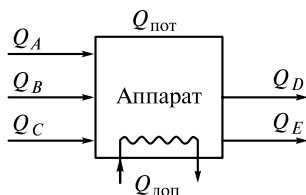


Рис. 1.3. К составлению уравнения теплового баланса

Закон равновесия системы. Система, находящаяся в состоянии равновесия, не меняет своего состояния во времени. Для выведения такой системы из состояния равновесия необходимо влияние на нее извне, например путем механического или теплового воздействия. Исследование этого закона опирается на два положения термодинамики: принцип Ле-Шателье и правило фаз Гиббса.

По принципу Ле-Шателье в системе, выведенной из состояния равновесия, происходят изменения, направление сил которых противоположно направлению сил, выводящих систему из равновесия.

По правилу фаз Гиббса устанавливается зависимость между числами компонентов системы K , числом фаз f и числом степеней свободы S :

$$S = K - f + 2. \quad (1.3)$$

Поясним некоторые понятия: *компонент* — чистые химические соединения (из них состоят фазы); *фаза* — определенное количество вещества физически однородное во всей массе (из них состоят системы); *система* — совокупность нескольких фаз.

Закон переноса массы и энергии и закон движущей силы. Для интенсификации производства необходимо, чтобы технологические процессы протекали с возможно большей скоростью.

Единство кинетических закономерностей групп основных гидромеханических, тепло- и массообменных процессов позволяет сформулировать общий закон, описывающий процессы массо-энергопереноса: скорость процесса переноса I прямо пропорциональна движущей силе D и обратно пропорциональна сопротивлению переноса R :

$$I = \frac{D}{R} = DK. \quad (1.4)$$

Величину $K = 1/R$, обратную сопротивлению, называют коэффициентом скорости процесса.

Для гидромеханических процессов, например для фильтрации, кинетическое уравнение может быть записано в виде

$$dV/(Fdt) = (1/R_r)\Delta P = K_r\Delta P,$$

где V — объем фильтра, m^3 ; F — площадь поверхности фильтра, m^2 ; τ — время протекания процесса, s ; R_r — гидравлическое сопротивление фильтра; $K_r = 1/R_r$ — коэффициент проводимости фильтрующей среды; ΔP — разность давлений, Pa (движущая сила процесса).

Для тепловых процессов кинетическое уравнение имеет вид

$$dQ/(F d\tau) = (1/R_T)\Delta t = K\Delta t,$$

где Q — количество теплоты, кДж; F — площадь поверхности теплообмена, м²; τ — время протекания процесса, с; $R_T = 1/K$ — сопротивление переносу теплоты; K — коэффициент теплопередачи (теплопроводимости), Вт/(м²·К); Δt — разность температур (движущая сила процесса), К.

Для массообменных процессов кинетическое уравнение имеет вид

$$dM/(F d\tau) = (1/R'_M)\Delta C = K'\Delta t,$$

где dM — масса вещества, переданного за время τ , кг; F — площадь поверхности массообмена, м²; $R'_M = 1/K'$ — сопротивление массопередачи; ΔC — разность концентраций, кг/м³ (движущая сила процесса); K' — коэффициент, характеризующий интенсивность передачи массы (коэффициент массопроводности), кг/(м²·с·кг/м³).

Принцип оптимизации проведения процесса. При проведении любого процесса всегда возникает возможность выбора нескольких вариантов решения.

Выбор наиболее целесообразного варианта называется *оптимизацией*.

В качестве критерия оптимизации чаще всего выбирается минимум времени и затрат на производство продукции. Следует отметить, что этот критерий связан со стоимостью энергии, рабочей силы и материалов, что создает некоторую его неустойчивость.

Оптимизация всегда сводится к нахождению наиболее выгодного компромисса между значениями параметров, противоположно влияющих на процесс. Минимум затрат достигается выбором целесообразного проведения процесса и его аппаратного оформления.

Каждый процесс требует индивидуальных условий его проведения. При этом существуют общие условия для всех процессов, к которым относятся следующие.

Непрерывность процесса. Процессы подразделяются на периодические, непрерывные и смешанные.

В *периодическом процессе* исходные компоненты поступают в аппарат, подвергаются в нем той или иной обработке, затем выгружаются. Аппарат загружают вновь. Отдельные операции процесса производятся в одном аппарате, но в определенной последовательности.

В *непрерывном процессе* отдельные операции процесса производятся одновременно в одном аппарате или в разных.

В *смешанном процессе* отдельные операции производятся периодически в аппаратах периодического действия, а остальные — в аппаратах непрерывного действия.

Направленность обменивающихся потоков. При изменении состояния системы, взаимодействующие потоки могут иметь разные направления:

- могут идти параллельными потоками;
- противотоком;
- смешанным потоком.

Обновление поверхности контакта фаз. При проведении обменных процессов необходимо осуществлять более тесный контакт обменивающихся сред для интенсификации самого процесса обмена. Примером обновления поверхности контакта фаз может служить турбулентный режим движения сред при переносе массы и теплоты, предусматривающий обеспечение максимального сопротивления контактирующих сред при непрерывном обновлении поверхности контакта.

Принцип масштабного перехода и моделирования. Теория подобия. Разработка нового процесса обычно начинается с экспериментов на лабораторных, полупроизводственных моделях и производственных установках. С помощью них устанавливают, как должен протекать процесс, чтобы он был экономически и технологически наиболее совершенным.

Для изучения процессов аналитическим и опытным путем принимают теорию подобия, в которой рассматривается, как нужно ставить опыты и обрабатывать опытные данные, чтобы, ограничившись минимальным числом экспериментов, обоснованно обобщить их результаты и получить закономерности для целой группы процессов, протекающих в условиях, отличных от экспериментальных.

Понятие подобия заимствовано из геометрии и распространено на физические явления, процессы и аппараты. Отмечают, например, механическое подобие двух систем, подобие потоков жидкости или газа, подобие тепловых потоков и др.

Основы теории подобия в современном ее понимании были разработаны В.Л. Кирпичевым. Его идеи затем были развиты в работах Н. Нуссельта, М.В. Кирпичева, М.А. Михеева, А.А. Гухмана и др.

Теория подобия применима только к процессам одной и той же группы, которые можно описать аналитическими уравнениями одинаковой формы и физической сущности.

Из аналитических уравнений можно получить критерии подобия — безразмерные отношения физических величин. Они названы именами ученых, сделавших открытие в соответствующих областях науки (обозначены начальными буквами их фамилий), например: критерий Архимеда (Ar) — критерий свободной конвекции и свободного осаждения в жидкости; критерий Рейнольдса (Re) — критерий режима движения жидкости и др.

Так как подобные процессы имеют одинаковые критерии подобия, то при проведении опытов необходимо измерять те вели-

чины, которые входят в выражения для критериев подобия изучаемого процесса.

Зависимость между величинами, характеризующими процесс, может быть представлена в виде зависимости между критериями подобия или в виде обобщенного критериального уравнения.

Основываясь на знаниях теории подобия, разработку нового процесса или аппарата проводят в соответствии с принципами моделирования.

Модель должна быть геометрически подобной аппарату, и все процессы, протекающие в ней, должны быть подобны процессам, протекающим в аппарате.

Классификация основных процессов пищевой технологии. В курсе «Процессы и аппараты» рассматриваются четыре основные группы типовых процессов, разделение на которые проведено в зависимости от основных закономерностей, характеризующих их протекание, и движущей силы:

механические процессы, основой которых является механическое воздействие на твердые материалы. К ним относят измельчение, сортирование, прессование и смешивание сыпучих материалов. Движущей силой этих процессов являются силы механического давления или центробежная сила;

гидромеханические процессы, основой которых является гидростатическое или гидромеханическое воздействие на материалы. К ним относят осаждение, фильтрование, центрифугирование, перемешивание и очистку воздуха и газов. Движущей силой этих процессов являются гидростатическое и гидродинамическое давления или центробежная сила;

тепловые процессы, основой которых является изменение теплового состояния взаимодействующих сред. К ним относят нагревание, охлаждение, выпаривание, конденсацию и получение искусственного холода. Движущей силой этих процессов является разность температур взаимодействующих сред;

массообменные процессы, в которых наряду с теплопередачей большую роль играет переход вещества из одной фазы в другую за счет диффузии. К ним относят абсорбцию, адсорбцию, сушку, перегонку и ректификацию, экстрагирование и кристаллизацию. Движущей силой этих процессов является разность концентраций переходящего вещества во взаимодействующих фазах.

1.2. Свойства сырья, продуктов и полуфабрикатов

Пищевое производство характеризуется как видом перерабатываемого сырья, его химическими и физическими свойствами, так и определенными свойствами и показателями готовой продукции.

Цель обработки — добиться желаемых качественных показателей готового продукта путем обработки сырья, чтобы задержать его порчу, либо вызвать изменения в структуре сырья и сделать продукт непохожим на исходный.

В пищевой промышленности обычно используется сырье растительного и животного происхождения (овощи, фрукты, яйца, мясо, рыба и др.). В живых клетках этих продуктов протекают ферментативные реакции, характерные группе живых организмов. После гибели клеток ферментативные реакции нарушаются, в результате чего происходят изменения, которые в итоге приводят к порче продуктов. Другие виды порчи появляются в результате развития микроорганизмов или протекания чисто химических реакций (окисление).

Состав и характеристики сырья зависят в значительной степени от условий производства и технических свойств сырья.

К техническим свойствам материалов относят:

- структурно-механические;
- теплофизические;
- физико-химические.

Структурно-механические свойства материалов. Структурно-механические свойства материалов зависят от их строения, структуры и характеризуются в основном предельным напряжением разрушения (для сыпучих и упруго-вязких материалов), вязкостью (для жидких, газов и пластических материалов), структурным сопротивлением при фильтровании (для осадков и пористых материалов) и др.

Плотность однокомпонентного однородного вещества определяется его массой в единице объема, кг/м³:

$$\rho = m/V, \quad (1.5)$$

где m — масса вещества, кг; V — объем вещества, м³.

Сыпучие и пористые материалы характеризуются также объемной массой и пористостью (порозностью).

Насыпная масса ρ_m свободно насыпаемого материала имеет ту же размерность (кг/м³), что и плотность твердых частиц ρ_t , но относится ко всему объему материала вместе с его порами; она определяется по формуле

$$\rho_m = \rho_t (1 - \epsilon),$$

где ϵ — пористость, характеризующая степень уплотнения сыпучего или пористого материала, представляет собой отношение объема пустот между частицами к полному объему материала.

Для свободно насыпанных материалов, состоящих из неоднородных по форме частиц, $\epsilon = 0,38 \dots 0,42$.

Суспензии, эмульсии и растворы характеризуются плотностью, концентрацией внутренней фазы и вязкостью. Плотность раство-

ров определяют с помощью плотномеров, а плотность суспензий ρ_c определяют по сумме объемов жидкой и твердой фаз, входящих в их состав.

Обозначив через x_t массовую долю твердой фазы в суспензии, через ρ_t и $\rho_{ж}$ плотности соответственно твердых частиц и жидкости, получим объем суспензии $1/\rho_c$:

$$1/\rho_c = x_t/\rho_t + (1 - x_t)/\rho_{ж},$$

откуда плотность суспензии, кг/м³:

$$\rho_c = 1/[x_t/\rho_t + (1 - x_t)/\rho_{ж}].$$

Все *вещества* характеризуются кроме плотности удельным весом, который не является физико-химической характеристикой вещества, так как зависит от места измерения.

Удельный вес — вес единицы объема жидкости, Н/м³:

$$\gamma = \frac{G}{V}, \quad (1.6)$$

где G — вес жидкости, Н; V — объем жидкости, м³.

Подставив в выражение (1.5) значение $m = G/g$ и заменив G/V через γ , легко убедиться, что удельный вес связан с плотностью следующим соотношением:

$$\gamma = \rho g, \quad (1.7)$$

где g — ускорение силы тяжести, м/с².

Плотность капельных жидкостей незначительно увеличивается с повышением давления и обычно несколько уменьшается с возрастанием температуры.

Плотность *газов* значительно изменяется в зависимости от температуры и давления. Зависимость между температурой, давлением и объемом газов определяется уравнением Клапейрона — Менделеева:

$$pV = \frac{mRT}{M}, \quad (1.8)$$

где p — давление, Н/м²; V — объем газа, м³; m — масса газа, кг; R — универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль · град); T — температура газа, К; M — молекулярная масса газа.

Из уравнения (1.8) следует, что

$$p = \frac{m}{V} \frac{RT}{M} = \frac{\rho RT}{M}. \quad (1.9)$$

Объем, занимаемый единицей массы вещества, называется **удельным объемом**. Так, если масса жидкости m , то удельный объем, $\text{м}^3/\text{кг}$:

$$v = \frac{V}{m}.$$

Удельный объем является величиной, обратной плотности, т.е.

$$v = \frac{1}{\rho}.$$

При движении реальной жидкости в ней возникают силы внутреннего трения, оказывающие сопротивление движению. Свойство жидкости оказывать сопротивление движению называется **вязкостью**.

Допустим, что жидкость движется по трубе параллельными концентрическими слоями (рис. 1.4), если некоторый слой имеет скорость w , то соседний с ним слой имеет скорость $w \pm \Delta w$. Следовательно, слои движутся с относительной скоростью Δw . Опыт показывает, что скорость слоев уменьшается от оси к стенкам трубы, причем возле стенок частицы жидкости как бы прилипают к стенкам, т.е. скорость жидкости становится равной нулю. Для перемещения каждого слоя относительно другого надо приложить некоторую силу, пропорциональную поверхности соприкосновения слоев. Эта сила T , отнесенная к единице поверхности F , называется **напряжением внутреннего трения**:

$$\tau = \frac{T}{F}, \quad (1.10)$$

причем согласно закону Ньютона

$$\tau = \mu \frac{\Delta w}{\Delta n}, \quad (1.11)$$

где $\frac{\Delta w}{\Delta n}$ — градиент скорости по нормали, т.е. относительное изменение скорости на единицу расстояния между слоями по

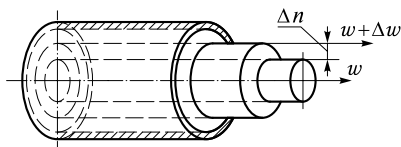


Рис. 1.4. К определению вязкости жидкости

направлению, перпендикулярному направлению течения жидкости.

Входящий в уравнение (1.11) коэффициент пропорциональности μ зависит от физических свойств жидкости и называется *динамическим коэффициентом вязкости* или просто *вязкостью*.

Единица измерения динамической вязкости μ в системе СИ: паскаль на секунду (Па · с).

Отношение вязкости μ к плотности ρ жидкости называется *кинематическим коэффициентом вязкости*, или *кинематической вязкостью*:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}. \quad (1.12)$$

Единица измерения кинематической вязкости ν в системе СИ: квадратный метр в секунду ($\text{м}^2/\text{с}$).

Вязкость капельных жидкостей с повышением температуры уменьшается, вязкость газов — увеличивается. Изменение вязкости в зависимости от давления незначительно и обычно не учитывается (исключая область высоких давлений).

Теплофизические свойства материалов. Молекулярный перенос теплоты в сплошной среде называется *теплопроводностью*.

Коэффициент теплопроводности λ твердых тел, жидкостей и газов является теплофизическим параметром этих тел, характеризующим интенсивность теплопроводности в веществе и численно равный плотности теплового потока вследствие теплопроводности при градиенте температуры, равном 1.

Отношение количества теплоты, сообщаемой веществу в каком-либо процессе, к соответствующему изменению температуры называется *теплоемкостью* вещества.

Удельная теплоемкость — это теплоемкость единицы количества вещества.

Массовая удельная теплоемкость — это количество теплоты, которое необходимо сообщить единице массы вещества для повышения его температуры на 1 градус.

Коэффициент теплоемкости C является теплофизическим параметром, зависящим от состава материала и температуры.

Физико-химические свойства материалов. Физико-химические свойства материалов характеризуются растворимостью, поверхностным натяжением, коэффициентом диффузии, испарения и др. Значения этих свойств обычно приводятся в справочной и специальной литературе.

Рассмотрим *поверхностное натяжение*. Молекулы жидкости, расположенные на ее поверхности или непосредственно у поверхности, испытывают притяжение со стороны молекул, находящихся внутри жидкости, в результате чего возникает давление, направ-