

Б. Охлаждающие агенты, способы охлаждения и конденсации	324
8. Охлаждение до обыкновенных температур	324
9. Охлаждение до низких температур	325
10. Конденсация паров	325
В. Конструкции теплообменных аппаратов	326
11. Трубчатые теплообменники	327
12. Змеевиковые теплообменники	331
13. Пластинчатые теплообменники	333
14. Оребренные теплообменники	334
15. Спиральные теплообменники	331
16. Теплообменные устройства реакционных аппаратов	335
17. Теплообменники других типов	336
18. Сравнительная характеристика теплообменных аппаратов	337
19. Конденсаторы смешения	338
20. Расчет теплообменных аппаратов	340
21. Расчет конденсаторов паров	343
Глава IX. Выпаривание	347
1. Общие сведения	347
2. Однокорпусные выпарные установки	349
3. Многокорпусные выпарные установки	354
4. Устройство выпарных аппаратов	364
5. Расчет многокорпусных выпарных аппаратов	377
МАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ	
Глава X. Основы массопередачи	382
1. Общие сведения	382
2. Равновесие при массопередаче	385
3. Скорость массопередачи	390
4. Движущая сила процессов массопередачи	410
5. Расчет основных размеров массообменных аппаратов	423
6. Массопередача с твердой фазой	430
Глава XI. Абсорбция	434
1. Общие сведения	434
2. Равновесие при абсорбции	434
3. Материальный и тепловой балансы процесса	437
4. Скорость процесса	440
5. Устройство абсорбционных аппаратов	442
6. Расчет абсорберов	458
7. Десорбция	467
8. Схемы абсорбционных установок	467
Глава XII. Перегонка жидкостей	471
1. Общие сведения	471
2. Характеристики двухфазных систем жидкость—пар	472
3. Простая перегонка	479
4. Ректификация	482
5. Специальные виды перегонки	512
Глава XIII. Экстракция	520
А. Процессы экстракции в системах жидкость—жидкость	520
1. Общие сведения	520
2. Равновесие в системах жидкость—жидкость	520
3. Методы экстракции	529
4. Устройство экстракционных аппаратов	538
5. Расчет экстракционных аппаратов	547
Б. Процессы экстракции и растворения в системах твердое тело—жидкость	550
6. Общие сведения	550
7. Равновесие и скорость процессов экстракции и растворения	551
8. Способы экстракции и растворения	553
9. Устройство экстракционных аппаратов	556
10. Расчет экстракционных аппаратов	560
Глава XIV. Адсорбция	563
1. Общие сведения	563
2. Характеристики адсорбентов и их виды	564
3. Равновесия при адсорбции	566
4. Скорость адсорбции	568

5. Десорбция	572
6. Устройство адсорберов и схемы адсорбционных установок	574
7. Расчет адсорберов	578
8. Ионобменные процессы	580
Глава XV. Сушка	583
1. Общие сведения	583
2. Основные параметры влажного газа	584
3. $I - x$ диаграмма влажного воздуха	586
4. Равновесие при сушке	590
5. Материальный и тепловой баланс сушки	593
6. Определение расходов воздуха и тепла на сушку	597
7. Варианты процесса сушки	600
8. Скорость сушки	608
9. Устройство сушилок	615
10. Специальные виды сушки и типы сушилок	627
Глава XVI. Кристаллизация	632
1. Общие сведения	632
2. Равновесие при кристаллизации	632
3. Скорость кристаллизации	634
4. Влияние условий кристаллизации на свойства кристаллов	636
5. Способы кристаллизации	637
6. Устройство кристаллизаторов	638
7. Расчеты кристаллизаторов	643
ХОЛОДИЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ	
Глава XVII. Искусственное охлаждение	646
1. Общие сведения	646
2. Термодинамические основы получения холода	647
3. Другие методы получения низких температур	653
Умеренное охлаждение	654
4. Компрессионные паровые холодильные машины	654
5. Абсорбционные холодильные машины	662
6. Пароводяные эжекторные холодильные машины	664
Глубокое охлаждение	665
7. Циклы с дросселированием газа	665
8. Циклы, основанные на сочетании дросселирования и расширения газа в детандере	671
9. Цикл Стирлинга для сжижения газов	675
10. Циклы с тепловым насосом	676
11. Сравнение основных циклов глубокого охлаждения	676
12. Методы разделения газов	678
МЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ	
Глава XVIII. Измельчение твердых материалов	679
1. Общие сведения	679
2. Физико-механические основы измельчения. Расход энергии	681
А. Крупное дробление	684
3. Щековые дробилки	684
4. Конусные дробилки	688
Б. Среднее и мелкое дробление	690
5. Валковые дробилки	690
6. Ударно-центробежные дробилки	691
В. Тонкое измельчение	693
7. Барабанные мельницы	693
8. Кольцевые мельницы	698
Г. Сверхтонкое измельчение	699
9. Мельницы для сверхтонкого измельчения	699
Глава XIX. Классификация и сортировка материалов	703
10. Грохочение	703
11. Гидравлическая классификация и воздушная сепарация	707
Глава XX. Смешение твердых материалов	711
Литература	715
Предметный указатель	719

ПРЕДИСЛОВИЕ К ВОСЬМОМУ ИЗДАНИЮ

Книга *А. Г. Касаткина* «Основные процессы и аппараты химической технологии» была впервые издана в 1935 г. и с тех пор приобрела широкую популярность. При жизни автора она выдержала семь изданий и сыграла большую роль не только в качестве учебника для студентов химико-технологических вузов, но и как руководство для инженерно-технических работников химической и родственных ей отраслей промышленности.

Это побудило кафедру «Процессов и аппаратов» Московского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени химико-технологического института им. Д. И. Менделеева, руководителем которой в течение ряда лет был А. Г. Касаткин, и издательство «Химия» предпринять труд по подготовке и выпуску посмертного издания учебника А. Г. Касаткина.

За годы, прошедшие со времени выхода в свет последнего издания книги (1960 г.), достигнуты значительные успехи в разработке научных основ химической технологии, создании новых интенсивных и высокопроизводительных процессов и аппаратов, а также в совершенствовании уже известных процессов и аппаратов. Эти успехи обусловили значительный технический прогресс химической технологии.

Директивами XXIV съезда КПСС по пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР на 1971—1975 гг. намечено дальнейшее ускоренное развитие химической и нефтехимической промышленности, предусматривается «... широкое внедрение прогрессивных, особенно непрерывных, технологических процессов; ускорение разработки и промышленного внедрения новых процессов химической технологии». Отсюда вытекает необходимость углубления и совершенствования науки об основных процессах и аппаратах, разрешения наиболее сложных проблем гидродинамических, тепловых, массообменных и других процессов. Все это потребовало осветить в новом издании книги ряд новых вопросов и более углубленно изложить некоторые разделы курса.

При переработке книги учитывалось, что основные разделы курса процессов и аппаратов развились за последние годы в самостоятельные технические дисциплины, которым посвящены специальные монографии и учебные пособия. Кроме того, объем книги должен быть ограничен содержанием учебной программы по курсу и количеством отводимых часов для его изучения. Поэтому в учебнике приведены лишь сведения, достаточные для уяснения и анализа физико-химической сущности процессов, их механизма и оптимальных условий проведения, а также рассмотрены принципы устройства типовых аппаратов и общая методика их расчета.

Более подробные материалы, в том числе различные расчетные эмпирические и полумэмпирические уравнения, данные каталожного характера об аппаратуре, значения физических констант и т. д., читатель найдет в специальной и справочной литературе, на которую приводятся ссылки в тексте и в конце книги.

Некоторые части текста, напечатанные мелким шрифтом, предназначены для углубленного изучения предмета или представляют собой расчетные зависимости, приводимые в книге в основном в качестве примеров.

В связи с тем, что для учебной литературы принята как предпочтительная Международная система (СИ), все расчетные уравнения и числовые значения величин приведены в этой системе, причем в ряде случаев указываются (в скобках) значения тех же величин в системе МКГСС.

При рецензировании данного издания книги заведующим кафедрой «Процессов и аппаратов» Горьковского политехнического института проф. *В. И. Матрозовым* и другими рецензентами были сделаны ценные замечания, учтенные при окончательной подготовке рукописи к печати. Коллектив авторов, участвовавших в переработке учебника, считает своим приятным долгом выразить признательность всем, способствовавшим лучшему изложению курса.

Книгу переработали ученики и сотрудники *А. Г. Касаткина*: главу I — *С. З. Каган* и *В. М. Лекае*; главу II — *И. А. Гильденблат* и *С. З. Каган*; главы III, IV и VI — *В. Г. Труханов*; главу V — *В. А. Жужиков* (разделы «Фильтрование» и «Центрифугирование») и *Г. С. Борисов* (остальные разделы); главы VII и VIII — *В. М. Лекае*; главы IX, XII и XVI — *Л. Н. Елкин*; главы X и XIII — *С. З. Каган*; главу XI — *Ю. И. Дытнерский*; главы XIV, XV и XVII — *Е. Н. Серпионова*; главы XVIII — XX — *Ю. П. Кузнецов*.

Книга выходит под общей редакцией проф. *С. З. Кагана* (главы III, IV, V, VI, VII, VIII, IX, XI, XII, XIV, XV и XVII) и проф. *В. М. Лекае* (главы IX, XVI, XVIII, XIX и XX).

ПРЕДИСЛОВИЕ К ДЕВЯТОМУ ИЗДАНИЮ

Восьмое, переработанное издание книги *А. Г. Касаткина* «Основные процессы и аппараты химической технологии» быстро разошлось и получило положительные отзывы рецензентов и читателей. Это вызвало необходимость переиздания книги. В девятом издании исправлены обнаруженные ошибки и опечатки, сделаны некоторые дополнения, а также учтен ряд пожеланий, высказанных в отзывах.

Авторский коллектив выражает благодарность лицам, приславшим свои замечания по восьмому изданию книги, и при переработке материала к последующим изданиям более полно учтет поступившие предложения с тем, чтобы отразить некоторые аспекты быстро развивающейся науки о процессах и аппаратах.

Г Л А В А I

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1. Предмет курса «Процессы и аппараты»

В химической промышленности осуществляются разнообразные процессы, в которых исходные материалы в результате химического взаимодействия претерпевают глубокие превращения, сопровождающиеся изменением агрегатного состояния, внутренней структуры и состава веществ. Наряду с химическими реакциями, являющимися основой химико-технологических процессов, последние обычно включают многочисленные физические (в том числе механические) и физико-химические процессы. К таким процессам относятся: перемещение жидкостей и твердых материалов, измельчение и классификация последних, сжатие и транспортирование газов, нагревание и охлаждение веществ, их перемешивание, разделение жидких и газовых неоднородных смесей, выпаривание растворов, сушка материалов и др. При этом способ проведения указанных процессов часто определяет возможность осуществления, эффективность и рентабельность производственного процесса в целом.

Таким образом, технология производства самых разнообразных химических продуктов и материалов (кислот, щелочей, солей, минеральных удобрений, красителей, полимерных и синтетических материалов, пластических масс и т. д.) включает ряд однотипных физических и физико-химических процессов, характеризующих общими закономерностями. Эти процессы в различных производствах проводятся в аналогичных по принципу действия машинах и аппаратах.

Процессы и аппараты, общие для различных отраслей химической технологии, получили название **основных процессов и аппаратов**. Например, одним из основных процессов является **перегонка** (ректификация) — процесс разделения жидких смесей, основанный на различии давления паров компонентов смеси. Этот процесс применяется для разделения жидкого воздуха в производстве кислорода, разделения воды и азотной кислоты в производстве азотной кислоты, разделения сложной смеси органических продуктов для получения дивинила в производстве синтетического каучука и во многих других химических производствах.

К числу основных аппаратов относятся тарельчатые и насадочные колонны, широко применяемые не только для проведения процессов ректификации, но также для извлечения компонентов из газовых или паровых смесей жидким поглотителем (процессы абсорбции), очистки газов от пыли и т. д.

Насосы и компрессоры, фильтры и центрифуги, теплообменники и сушилки также относятся к числу основных аппаратов и машин, которые в разных сочетаниях составляют типовое оборудование большинства химических производств.

В курсе «Процессы и аппараты» изучаются теория основных процессов, принципы устройства и методы расчета аппаратов и машин, используемых для проведения этих процессов. Анализ закономерностей основных процессов и разра-

ботка обобщенных методов расчета аппаратов производится исходя из фундаментальных законов физики, химии, физической химии, термодинамики, экономики и других наук. Курс строится на основе выявления аналогий и внешне разнородных процессов и аппаратов независимо от отрасли химической промышленности, в которой они используются.

В этом курсе изучаются также закономерности перехода от лабораторных процессов и аппаратов к промышленным. Знание закономерностей перехода от одного масштаба к другому и переноса данных, полученных на одной системе — модели, на другую систему, представляющую собой объект натуральной величины (моделирование), необходимо для проектирования большинства современных, обычно много-тоннажных, производственных процессов химической технологии. Так, например, химический процесс, изученный в лаборатории (в малом масштабе) с точки зрения механизма реакции, закономерностей ее протекания во времени и т. п., далеко не всегда может быть воспроизведен с теми же показателями в крупном масштабе. Для осуществления процесса в промышленном реакторе помимо химической сущности процесса должны быть установлены его параметры в зависимости от конструкции аппарата, структуры потоков и режимов их движения, скорости переноса тепла и массы и др. Совокупное влияние этих факторов определяет так называемую макрокинетику процесса, связанную с массовым движением макрочастиц — пузырей, капель, струй и т. п.

В науке о процессах и аппаратах изучается макрокинетика основных процессов химической технологии. При этом используются данные по микрокинетике, характеризующей элементарными, независимо протекающими на молекулярном уровне процессами, такими, как теплопроводность, молекулярная диффузия и т. д., которые рассматриваются в физике, физической химии, химической термодинамике и других науках.

Сказанным определяется значение курса «Процессы и аппараты» для изучения не только физических, но и химических промышленных процессов, а также аппаратов для их проведения, причем проблемы масштабирования и моделирования особенно интенсивно разрабатываются в последние годы.

Таким образом, курс «Процессы и аппараты» является инженерной дисциплиной, представляющей собой важный раздел теоретических основ химической технологии. Этот курс можно охарактеризовать как составную часть комплекса дисциплин, освещающих различные аспекты химической технологии как науки. К таким дисциплинам относятся курсы общей химической технологии и технологии конкретных отраслей химической промышленности, для которых производится подготовка инженеров (химиков-технологов). В частности, с курсом «Процессы и аппараты» тесно связан учебный курс «Общая химическая технология», в котором также изучаются общие закономерности химической технологии путем обобщения принципов построения производственных схем химико-технологических процессов и анализа вопросов наиболее рационального, комплексного использования сырья, энергии и др. Оба курса освещают общие начала, которые должны быть синтетически использованы при разработке наиболее эффективных с технико-экономической точки зрения процессов производства в любых отраслях химической технологии.

Применение методов и технических средств современной кибернетики значительно облегчает моделирование химико-технологических процессов, включая математическое моделирование, осуществляемое при помощи электронных вычислительных машин. Поэтому связь курса «Процессы и аппараты» с курсом «Химическая кибернетика» является наиболее плодотворной для изучения и проектирования сложных, в том числе химических, процессов химической технологии.

2. Возникновение и развитие науки о процессах и аппаратах

Химическая промышленность начала создаваться на рубеже XVIII и XIX веков и за исторически короткий период, насчитывающий всего 120—150 лет, превратилась в технически развитых странах в одну из основных и ведущих отраслей народного хозяйства. С развитием химической промышленности возникла потребность в инженерной науке, обобщающей закономерности основных производственных процессов и разрабатывающей методы расчетов аппаратов на основе их рациональной классификации.

В нашей стране идея об общности ряда основных процессов и аппаратов, применяемых в различных химических производствах, была высказана проф. Ф. А. Денисовым еще в 1828 г. *. Позднее аналогичные принципы развивались Д. И. Менделеевым, предложившим собственную классификацию основных процессов химической технологии **. Эти идеи легли в основу новой учебной дисциплины по расчету и проектированию основных процессов и аппаратов, которая была введена проф. А. К. Крупским в конце 90-х годов прошлого века в Петербургском технологическом институте и несколько позднее проф. И. А. Тищенко в Московском Высшем техническом училище. Цикл лекций, читавшихся этими учеными, можно рассматривать как прообраз современного курса по основным процессам и аппаратам химической технологии. Поэтому А. К. Крупский и И. А. Тищенко по праву считаются основоположниками курса «Процессы и аппараты» в нашей стране.

Книга А. К. Крупского «Начальные главы учения о проектировании по химической технологии» (1909 г.) была, по существу, одной из первых попыток обобщения теории основных физических и физико-химических процессов независимо от отрасли химической промышленности, в которой они используются. В США аналогичный труд Уокера, Льюиса и Мак-Адамса «Принципы науки о процессах и аппаратах» вышел в свет в 1923 г. Несколько лет спустя в СССР была издана книга проф. А. А. Кирова по аппаратуре и основным процессам химической технологии (1927 г.).

Большой вклад в разработку отдельных разделов науки о процессах и аппаратах внесли И. А. Тищенко, автор теории расчета выпарных аппаратов ***, Д. П. Коновалов, заложивший основы теории перегонки жидких смесей ****, Л. Ф. Фокин и К. Ф. Павлов, создавшие оригинальные и глубокие по содержанию монографии по основным процессам и аппаратам *****. Из зарубежной литературы, посвященной принципам расчета основных процессов, устройству и расчету типовых аппаратов, можно отметить выпущенную в США (1931 г.) книгу В. Бэджера и В. Мак-Кэба, изданную на русском языке в 1933 г. под названием «Основные процессы и аппараты химических производств».

В течение последних пятидесяти лет наука о процессах и аппаратах непрерывно развивалась. Ее роль и значение в разработке на научных основах аппаратурно-технологического оформления химических производств, их интенсификации, а также в создании новых производств неизменно возрастали. Так, еще в 30-х годах жидкостная экстракция использовалась в химической технологии в основном для препаративных и аналитических целей и не рассматривалась в литературе по процессам и аппаратам того времени как один из основных процессов. В настоящее время этот перспективный метод разделения жидких смесей получил значительное промышленное применение и для его осуществления разработана разнообразная аппаратура интенсивного действия (см. главу XIII).

В качестве другого примера можно указать на процессы адсорбции для разделения газовых и паро-газовых смесей. Со времени изобретения акад. Н. Д. Зелинским универсального угольного противогаса (1915 г.) адсорбция применялась в промышленности главным образом для рекупе-

* Денисов Ф. А. Пространное руководство к общей технологии или к познанию всех работ, средств, орудий и машин, употребляемых в разных химических искусствах. М., 1828. 548 с.

** Стабников В. Н. Д. И. Менделеев и наука о процессах и аппаратах. — В сб.: Химическое машиностроение. Вып. 11, Киев, «Техніка», 1970. См. с. 50.

*** Тищенко И. А. Основные процессы и аппараты химической технологии. Вып. 1—2. М., 1913—1914. 161 + 240 с.

**** Коновалов Д. П. Материалы и процессы химической технологии. Ч. 1. Л., Госиздат, 1924. 104 с.; Коновалов Д. П. Материалы и процессы химической технологии. Ч. 2. Л.—М., Госиздат, 1925. 275 с.

***** Фокин Л. Ф. Методы и орудия химической техники, Ч. 1. Обработка газов. Петроград—Москва, Госиздат, 1923. 295 с.; Фокин Л. Ф. Методы и орудия химической техники. Ч. 2. Обработка жидкостей. Л., Госиздат, 1925. 540 с.

рации из воздуха производственных помещений паров летучих растворителей — бензола, ацетона и т. п. Еще двадцать пять лет тому назад процесс проводился только в громоздких периодически действующих аппаратах с неподвижным слоем зернистого адсорбента (активированного угля). В настоящее время успешно внедряются высокоэффективные непрерывно действующие адсорбционные установки с движущимся и кипящим слоем адсорбента, а процессы адсорбции широко применяются для выделения индивидуальных газов (этилена, метана, ацетилена и др.) из газовых смесей, обогащения слабых нитрозных газов и т. д. Адсорбционные процессы и аппараты получают дальнейшее развитие в связи с использованием для разделения газов пористых кристаллов (молекулярных сит) и ионообменных смол (ионитов), вопросы применения которых рассматриваются в главе XIV.

Еще одним наглядным примером достижений науки о процессах и аппаратах является создание за последние годы высокопроизводительной аппаратуры с псевдоожиженным (кипящим) слоем зернистого материала, позволяющей интенсифицировать не только процессы адсорбции, но и ряд других гетерогенных процессов (сушка, кристаллизация и др.).

Разработка указанных выше основных процессов и аппаратов, а также других прогрессивных методов разделения и очистки веществ стимулируется непрерывно расширяющимся за последние годы промышленным использованием атомной энергии, значительным развитием производств изотопов некоторых элементов (урана, водорода и др.), полупроводниковых материалов, мономеров, полупродуктов для синтетических материалов и т. д. Эти отрасли новой техники предъявляют повышенные требования к чистоте продуктов и четкости разделения смесей. Для решения подобных проблем разрабатываются процессы пленочной ректификации, молекулярной дистилляции (глава XII), экстракционного разделения (глава XIII) и другие.

Значительные теоретические и экспериментальные исследования проводятся по моделированию процессов и аппаратов на основе принципов теории подобия (глава II), изучению гидравлики и механизма массообмена в сложных двухфазных и многофазных системах.

Химические аппараты и машины очень часто работают при больших скоростях рабочих сред, высоких давлениях, достигающих $6 \cdot 10^8$ н/м² (~ 6000 ат) и более, в широком диапазоне температур (примерно от -200 до $+1000^\circ$ С) и в сильно агрессивных средах. Для таких условий необходимы аппараты надежной конструкции, изготовленные из разнообразных конструкционных материалов, включая легированные, кислотостойкие и жаропрочные стали, пластические массы, керамику и др. Необходимы также автоматизация работы химического оборудования и дистанционное управление им (особенно во вредных и взрывоопасных химических производствах). В связи с этим для внедрения достижений науки о процессах и аппаратах важное значение имеет развитие химического машиностроения.

В настоящее время отечественное химическое машиностроение освоило производство широкой номенклатуры машин и аппаратов. Так, например, для сжатия азотоводородной смеси в производстве аммиака выпускаются шестирядные компрессоры производительностью $16\,600$ м³/ч, давлением $3,2 \cdot 10^7$ н/м² (320 ат) и мощностью привода 5000 квт, а для производства полиэтилена разработаны компрессоры на давление $3 \cdot 10^8$ н/м² (3000 ат). Налажен выпуск автоматических непрерывно действующих центрифуг большой производительности (до 50 т/ч и более), герметизированных взрывоопасных центрифуг для полимерных материалов и др. В связи с широким использованием природного газа в качестве химического сырья и значительным расширением производства азотных удобрений созданы воздухо-разделительные установки производительностью $15\,000$ м³/ч азота высокой степени чистоты ($99,998\%$ N₂) и 8000 м³/ч кислорода. Производительность кислородных установок в ближайшем будущем превысит $70\,000$ м³/ч O₂.

Приведенные примеры характеризуют значительно возросший технический уровень химического машиностроения. Однако дальнейшее развитие химической промышленности выдвигает перед наукой о процессах и аппаратах и химическим машиностроением еще более сложные задачи, связанные с внедрением новой, прогрессивной технологии и строительством производственных агрегатов большой мощности.

Наука о процессах и аппаратах призвана сыграть большую роль в дальнейшем ускорении темпов развития химической промышленности и тем самым способствовать решению основной исторической задачи — созданию материально-технической базы коммунизма в нашей стране.

3. Классификация основных процессов

Классификация основных процессов химической технологии может быть проведена на основе различных признаков.

В зависимости от основных законов, определяющих скорость процессов, различают:

1. **Гидромеханические процессы**, скорость которых определяется законами гидродинамики — науки о движении жидкостей и газов. К этим процессам относятся перемещение жидкостей, сжатие и перемещение газов, разделение жидких и газовых неоднородных систем в поле сил тяжести (отстаивание), в поле центробежных сил (центрифугирование), а также под действием разности давлений при движении через пористый слой (фильтрация) и перемешивание жидкостей.

2. **Тепловые процессы**, протекающие со скоростью, определяемой законами теплопередачи — науки о способах распространения тепла. Такими процессами являются нагревание, охлаждение, выпаривание и конденсация паров. К тепловым процессам могут быть отнесены и процессы охлаждения до температур более низких, чем температура окружающей среды (процессы умеренного и глубокого охлаждения). Однако вследствие многих специфических особенностей эти процессы выделены ниже в отдельную группу **холодильных процессов**.

Скорость тепловых процессов в значительной степени зависит от гидродинамических условий (скоростей, режимов течения), при которых осуществляется перенос тепла между обменивающимися теплом средами.

3. **Массообменные (диффузионные) процессы**, характеризующиеся переносом одного или нескольких компонентов исходной смеси из одной фазы в другую через поверхность раздела фаз. Наиболее медленной и поэтому обычно лимитирующей стадией массообменных процессов является молекулярная диффузия распределяемого вещества. К этой группе процессов, описываемых законами массопередачи, относятся абсорбция, перегонка (ректификация), экстракция из растворов, растворение и экстракция из пористых твердых тел, кристаллизация, адсорбция и сушка.

Протекание процессов массообмена тесно связано с гидродинамическими условиями в фазах и на границе их раздела и часто — с сопутствующими массообмену процессами переноса тепла (теплообмена).

4. **Химические (реакционные) процессы**, которые протекают со скоростью, определяемой законами химической кинетики. Однако химическим реакциям обычно сопутствует перенос массы и энергии, и соответственно скорость химических процессов (особенно промышленных) зависит также от гидродинамических условий. Вследствие этого скорость реакций подчиняется законам макрокинетики и определяется наиболее медленным из последовательно протекающих химического взаимодействия и диффузии. Общие закономерности протекания химических процессов и принципы устройства реакторов рассматриваются в специальной литературе*.

5. **Механические процессы**, описываемые законами механики твердых тел. Эти процессы применяются в основном для подготовки исходных твердых материалов и обработки конечных твердых продуктов, а также для транспортирования кусковых и сыпучих материалов. К механическим процессам относятся измельчение, транспортирование, сортировка (классификация) и смешение твердых веществ.

* См., например: Денбиг К. Г. Теория химических реакторов. Пер. с англ. Под ред. акад. Н. М. Жаворонкова. М., «Наука», 1968. 191 с.

Особую группу механических процессов составляют процессы переработки химических продуктов в изделия — прессование, литье, экструзия и др. Эти процессы и машины для их проведения специфичны для производств синтетических материалов и рассматриваются в специальных курсах.

По способу организации основные процессы химической технологии делятся на периодические и непрерывные.

Периодические процессы проводятся в аппаратах, в которые через определенные промежутки времени загружаются исходные материалы; после их обработки из этих аппаратов выгружаются конечные продукты. По окончании разгрузки аппарата и его повторной загрузки процесс повторяется снова. Таким образом, периодический процесс характеризуется тем, что все его стадии протекают в одном месте (в одном аппарате), но в разное время.

Непрерывные процессы осуществляются в проточных аппаратах. Поступление исходных материалов в аппарат и выгрузка конечных продуктов производятся одновременно и непрерывно. Следовательно, непрерывный процесс характеризуется тем, что все его стадии протекают одновременно, но разобщены в пространстве, т. е. осуществляется в различных частях одного аппарата или же в различных аппаратах, составляющих данную установку.

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

Основные преимущества непрерывных процессов по сравнению с периодическими следующие: 1) нет перерывов в выпуске конечных продуктов, т. е. отсутствуют затраты времени на загрузку аппаратуры исходными материалами и выгрузку из нее продукции; 2) более легкое автоматическое регулирование и возможность более полной механизации; 3) устойчивость режимов проведения и соответственно большая стабильность качества получаемых продуктов; 4) большая компактность оборудования, что сокращает капитальные затраты и эксплуатационные расходы (на ремонты и пр.); 5) более полное использование подводимого (или отводимого) тепла при отсутствии перерывов в работе аппаратов; возможность использования (рекуперации) отходящего тепла.

Благодаря указанным достоинствам непрерывных процессов при их проведении увеличивается производительность аппаратуры, уменьшается потребность в обслуживающем персонале, улучшаются условия труда и повышается качество продукции. По этим причинам в многотоннажных химических производствах имеется тенденция осуществлять преимущественно непрерывные процессы. Периодические процессы сохраняют свое значение главным образом в производствах относительно небольшого масштаба (в том числе в опытных) с разнообразным ассортиментом продукции, где применение указанных процессов позволяет достичь большой гибкости в использовании оборудования при меньших капитальных затратах.

Непрерывные процессы отличаются от периодических по распределению времени пребывания частиц среды в аппарате. В периодически действующем аппарате все частицы среды находятся одинаковое время, в то время как в непрерывно действующем аппарате времена пребывания их могут значительно различаться. По распределению времен пребывания различают две теоретические (предельные) модели аппаратов непрерывного действия: идеального вытеснения и идеального смешения.

В аппаратах идеального вытеснения все частицы движутся в заданном направлении, не перемешиваясь с движущимися впереди и сзади частицами и полностью вытесняя находящиеся впереди частицы потока. Все частицы равномерно распределены по площади поперечного сечения такого аппарата и действуют при движении подобно твер-