

Н. Ф. Еремин

ПРОЦЕССЫ
И АППАРАТЫ
В ТЕХНОЛОГИИ
СТРОИТЕЛЬНЫХ
МАТЕРИАЛОВ

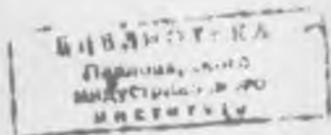
*учебник
для вузов*

ББК 38.3
Е70
УДК 691

Рецензенты:

кафедра «Процессы и аппараты химической технологии» Белгородского технологического института строительных материалов им. И. А. Гришманова (зав. кафедрой д-р техн. наук, проф. Ш. М. Рахимбаев);

кафедра «Производство строительных материалов и конструкций» Куйбышевского инженерно-строительного института им. А. И. Микояна (зав. кафедрой канд. техн. наук, доц. В. А. Белкин).



Еремин Н. Ф.

Е70) Процессы и аппараты в технологии строительных материалов: Учеб. для вузов по спец. «Пр-во строит. изделий и конструкций». — М.: Высш. шк., 1986. — 280 с.: ил.

В учебнике на современном научном уровне изложены основы механических, гидромеханических тепловых и массообменных процессов. Рассмотрены стадии технологических процессов при производстве строительных материалов: измельчение, классификация, перемешивание исходных компонентов и приготовление масс, формование и тепловая обработка изделий.

3203000000—217
001(01)—80 181—86

ББК 38.3

6С3

ПРЕДИСЛОВИЕ

Курс «Процессы и аппараты в технологии строительных материалов и изделий» в учебном плане подготовки инженеров-технологов (специальность 1207) является базисным для таких профилирующих дисциплин, как «Технология бетонных и железобетонных изделий», «Технология заполнителей бетона», «Технология теплоизоляционных и акустических материалов и изделий», «Тепловые установки» и др.

В настоящем курсе изучаются основы теории элементарных процессов и общие закономерности проведения отдельных стадий технологического процесса. Последнее обстоятельство отличает настоящий учебник как от традиционного изложения подобного курса в химико-технологических вузах, так и от соответствующего учебника для данной специальности, выпущенного в 1981 г. издательством «Вища школа» (И. М. Борщ, В. А. Вознесенский, В. З. Мухин и др.).

Автор выражает глубокую признательность коллективу кафедры «Производство строительных изделий и конструкций» Куйбышевского инженерно-строительного института им. А. И. Микояна (зав. кафедрой канд. техн. наук, доц. В. А. Белкин) и коллективу кафедры «Процессы и аппараты химической технологии» Белгородского технологического института строительных материалов (зав. кафедрой д-р техн. наук, проф. Ш. М. Рахимбаев) за ценные замечания и пожелания, высказанные при рецензировании рукописи, канд. техн. наук, проф. В. Н. Попко за обсуждение рукописи при подготовке ее к печати, а также проф. В. В. Перегудову, внесшему большой вклад в разработку методологических основ курса.

Автор

ВВЕДЕНИЕ

Создание материально-технической базы коммунизма, укрепление экономической мощи нашей страны, повышение материального и культурного благосостояния трудящихся требует дальнейшего увеличения объема капитального строительства во всех отраслях народного хозяйства. В этом деле важная роль принадлежит промышленности строительных материалов, обеспечивающей строительство разнообразными изделиями, деталями и конструкциями.

Находясь под влиянием требований строительства, промышленность строительных материалов, в свою очередь, воздействует на технический прогресс в строительстве, активно преобразуя характер и темп строительного производства.

Внедрение эффективных материалов и изделий имеет важное значение для развития индустриализации строительства, повышения производительности труда, снижения стоимости и повышения качества возводимых сооружений. Поэтому успехи капитального строительства, обеспечивающего высокие темпы непрерывного роста экономики страны, во многом зависят от уровня и темпов развития промышленности строительных материалов, а также от качества и эффективности выпускаемой ею продукции.

Основными направлениями экономического и социального развития СССР на 1986—1990 гг. и на период до 2000 г., принятыми на XXVII съезде партии, предусмотрено увеличить объем производства эффективных строительных материалов. Необходимо расширить выпуск новых строительных материалов, эффективных сборных строительных элементов, легких и экономичных крупногабаритных конструкций и изделий улучшенного качества с высокой степенью заводской готовности, обеспечивающих повышение уровня индустриализации, снижение материалоемкости, а также долговечность, комфортабельность и архитектурную выразительность зданий и сооружений.

Немалую роль эта отрасль промышленности призвана сыграть и в решении задач, поставленных майским (1982 г.) Пленумом ЦК КПСС. Бетон для гигантских гидросооружений, разнообразные конструкции и детали для сельского жилищного строительства, сборный железобетон для элеваторостроения и животноводческих комплексов, дренажные трубы для мелиоративных сооружений — вот далеко не полный перечень объектов, имеющих важное значение в развитии сельскохозяйственной индустрии.

Все это свидетельствует о возрастающей роли промышленности строительных материалов в развитии строительства и в расширенном социалистическом воспроизводстве.

Необходимость изучения общих закономерностей при исследовании отдельных технологических процессов подчеркивал еще в начале века один из основоположников науки о процессах и аппаратах профессор Петербургского технологического института А. К. Крупский в своей книге «Начальные главы учения о проектировании химической технологии». Кстати, наука о процессах и аппаратах возникла и развивалась применительно к химической технологии.

В 1897 г. в книге «Основы фабрично-заводской промышленности» Д. И. Менделеев изложил принципы построения курса процессов и аппаратов и дал классификацию процессов химической технологии. В России первый учебник по этому курсу появился в 1913 г. Это была известная книга профессора И. А. Тищенко «Основные процессы и аппараты химической технологии». В дальнейшем этот курс получил развитие в трудах А. Г. Касаткина, П. Г. Романкова, А. Н. Плановского, Н. М. Жаворонкова, В. В. Кафарова и др.

В области строительных материалов идеи общего подхода к технологическим процессам отдельных производств неоднократно высказывались Б. Г. Скрамтаевым, А. В. Волженским, В. А. Воробьевым, Н. А. Поповым, Г. И. Горчаковым, И. А. Рыбьевым, И. Н. Ахвердовым, Ю. М. Баженовым и др. В разработке ряда общих положений курса процессов и аппаратов в технологии строительных материалов большое участие приняли Ю. С. Буров и В. В. Перегулов.

Еще В. И. Ленин в работе «Развитие капитализма в России» так охарактеризовал значение этой отрасли: «Одним из необходимых условий роста крупной машинной индустрии (и чрезвычайно характерным спутником ее роста) является развитие промышленности, дающей топливо и материалы для построек, и строительной промышленности»*.

Решение огромных задач, поставленных XXVII съездом КПСС перед строительной индустрией, невозможно без всемерного развития научных исследований в этой отрасли. В эпоху, когда все в большей мере проявляется роль науки как непосредственной производительной силы, главными становятся уже не отдельные ее достижения, какими бы блестящими они ни были, а высокий научно-технический уровень всего производства. Научно-техническая революция выдвинула требование коренной перестройки технической базы производства. Перед работниками всех отраслей промышленности, в том числе и промышленности строительных материалов, стоит важнейшая по научному и социальному характеру задача — органически соединить достижения научно-технической революции с преимуществами социалистической системы хозяйства, шире раз-

* Ленин В. И. Полн. собр. соч., т. 3, с. 525.

вить присущие социализму формы соединения науки с производством.

Для решения этой задачи необходима интенсификация технологических процессов, создание новых совершенных конструкций машин, механизация и автоматизация процессов производства, *сознательное и целесообразное* управление этими процессами.

При всем разнообразии технологических процессов в промышленности строительных материалов многие из них являются общими для различных производств. Так, процесс перемешивания встречается в технологии изготовления практически любого строительного материала. Он специфичен по некоторым технологическим параметрам для компонентов бетонной смеси и керамической массы, однако сам процесс описывается единым уравнением, т. е. подчиняется единому закону. Другой пример. Движение воздуха в сушилках для кирпича или транспортирование растворной смеси по трубам безусловно имеют свою специфику, однако обе эти технологические операции подчиняются единым законам гидромеханики. С другой стороны, в технологии строительных материалов имеются процессы, специфические только для данного вида производства или группы производств. Тепловлажностная обработка, например, — характерный тепловой процесс при производстве бетонных изделий, а обжиг — для керамических материалов. Таким образом, с этой точки зрения, процессы производства строительных материалов могут быть разделены на общие и специфические.

Курс «Процессы и аппараты...» рассматривает процессы независимо от вида производства, в котором эти процессы используются. Так, перемешивание раскрывается с общей точки зрения, а не с точки зрения применения этого процесса при производстве керамических изделий или сборного железобетона. Преимуществом такого подхода к изучению процессов является то, что студенты получают более широкую инженерную подготовку, знание общих закономерностей протекания процессов, основанное на использовании законов механики, гидродинамики, термодинамики и других основных технических дисциплин.

Таким образом, курс «Процессы и аппараты...» является связующим звеном между общетехническими и технологическими дисциплинами. Этот курс создает предпосылки для преподавания дисциплин специализаций с привлечением математического аппарата как для анализа физических явлений, протекающих на отдельных стадиях технологического процесса, так и для оптимизации их и всего процесса в целом.

Глава 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

§ 1.1. Краткая характеристика основных стадий технологического процесса

Народное хозяйство нашей страны включает в себя ряд взаимосвязанных отраслей, охватывающих как сферу материального производства, так и непроизводственную сферу деятельности людей.

Отрасль промышленности — это совокупность предприятий, специализированных на выпуске однородной продукции. Основными признаками, по которым предприятия объединяются в отрасли промышленности, являются прежде всего единство назначения выпускаемой продукции и общность (большая или меньшая) применяемого сырья и материалов, а также сходство технологических процессов.

Промышленность строительных материалов охватывает различные по своему характеру производства. Некоторые из них по указанным признакам имеют между собой мало общего. Однако все эти производства объединяет назначение выпускаемой продукции — применение ее в строительстве.

Технология — это наука о методах и способах переработки сырья в предметы потребления. Технология строительных материалов как прикладная наука базируется на научных данных физики, химии, механики и других естественных наук.

Любой технологический процесс представляет собой совокупность взаимосвязанных основных, вспомогательных и обслуживающих процессов.

Основным технологическим процессом является такой, в результате которого предметы труда превращаются в готовую продукцию, характерную для данного предприятия. Процесс производства какого-либо строительного материала состоит из отдельных *стадий* или *переделов*, которые, в свою очередь, подразделяются на ряд технологических операций, выполняемых для данного производства в строго определенной последовательности.

Технологическая операция состоит из отдельных элементов, представляющих собой законченное трудовое действие, и характеризуется неизменностью объекта обработки, рабочего места и исполнителей. В зависимости от степени технологического оснащения процесса операции могут быть ручные, машинные, автоматические и аппаратурные. *Ручные операции* выполняются с использованием простого и механизированного инструмента. *Машинные операции* осуществляются с помощью машин при непрерывном участии рабочих. *Автоматические операции* протекают без участия рабочего или только под его наблюдением. *Аппаратурные операции* (машинные и автоматические) характеризуются выполнением технологического процесса в специальных агрегатах. Участие рабочего в этом случае сводится к проверке соблюдения технологических режимов, а также к выполнению загрузочных и разгрузочных работ.

Поясним приведенную классификацию на примере производст-

ва железобетонных настилов перекрытий конвейерным способом. Технология их производства складывается из отдельных переделов, включающих приготовление бетонной смеси (технологические операции по дозированию и загрузке компонентов в бетоносмеситель, непосредственно перемешивание их, выгрузку), формование изделий (операции по подготовке формы, укладке в нее арматуры и бетона, уплотнение бетона), тепловлажностную обработку (операции по загрузке изделий в камеру, пропаривание их и выгрузку), дополнительные процессы (например, ремонт и доводка настилов). Такие операции, как чистка и смазка форм, укладка арматуры, распалубка изделий, заделка мелких раковин и сколов готовых изделий в принятой технологии, являются, как правило, ручными. На большинстве наших заводов дозировка и перемешивание компонентов бетона, формование изделий являются машинными операциями, выполняемыми при непрерывном участии рабочих. На передовых предприятиях эти же операции, а также пропарка изделий автоматизированы и протекают лишь под наблюдением оператора.

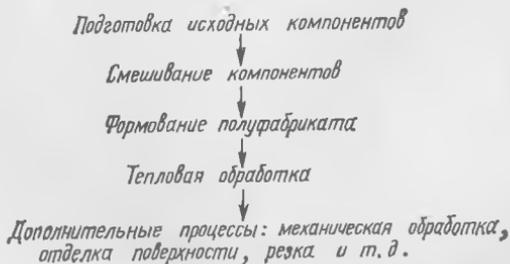
Все перечисленные машинные и автоматические операции являются аппаратными, поскольку протекают на специализированных установках и в агрегатах, предназначенных для выполнения той или иной операции.

Вспомогательные процессы характеризуются получением продукции, не являющейся основной для данного предприятия (ремонт оборудования и оснастки, производство электроэнергии, пара и т. д.).

Обслуживающие процессы создают условия для осуществления основных и вспомогательных процессов (внутризаводское транспортирование, система технического контроля и т. п.).

Несмотря на все многообразие выпускаемых промышленностью отдельных видов строительных материалов, в их технологии можно выделить ряд основных общих технологических переделов, характерных для производства большинства изделий. Но некоторые переделы могут и отсутствовать, даже при производстве одного и того же материала, но по разной технологии. Однако общая последовательность отдельных стадий технологического процесса для подавляющего большинства строительных материалов сохраняется без существенных изменений.

Последовательность основных переделов в промышленности строительных материалов представлена на схеме:



Рассмотрим указанную последовательность переделов на примере изготовления совершенно разнотипной продукции — лицевого керамического кирпича и железобетонного настила перекрытия.

Подготовительные операции при изготовлении кирпича связаны с предварительной обработкой глиняного сырья. Поступающая из карьера глина обычно непригодна для формования керамики, поэтому ее предварительная подготовка заключается в разрушении природной структуры, удалении каменистых включений и измельчении. В зависимости от принятого способа подготовки глины и ее начальной (карьерной) влажности глину предварительно высушивают или увлажняют. На железобетонные заводы сырье (щебень, песок, цемент), как правило, поступает уже в готовом виде. Предварительная подготовка их сводится лишь к подогреву заполнителей в зимнее время и иногда к домолу цемента. На некоторых предприятиях песок, добытый гидравлическим способом, предварительно подсушивают.

Операция по смешиванию компонентов при изготовлении кирпича часто совмещается с подготовительными операциями по измельчению глины. При этом в глину вводят отошающие, пластифицирующие и выгорающие добавки. Тип добавок и их количество определяются требуемыми технологическими свойствами массы. Перемешивание может быть и самостоятельной технологической операцией, не связанной с предварительной подготовкой карьерной глины. При производстве железобетонных изделий тщательное перемешивание компонентов — щебня, песка, цемента, воды и различных добавок — необходимая и ответственная операция. При прочих равных условиях хорошая гомогенизация смеси определяет качество получаемого изделия.

Формование преследует цель получить изделие заданной формы при требуемой плотности. Для большинства строительных материалов прослеживается четкая зависимость $R_{сж} = f(\rho)$, где $R_{сж}$ — предел прочности при сжатии; ρ — плотность.

Например, при одинаковом фазовом составе черепка зависимость прочности кирпича $R_{сж}$ от его коэффициента плотности $k_{пл}$ выражается формулой (по М. И. Роговому) $R_{сж} = R_0 k_{пл}^3$, где R_0 — предел прочности при сжатии абсолютно плотного черепка; $k_{пл}$ — коэффициент плотности, $k_{пл} = \rho/\rho_0$; ρ и ρ_0 — соответственно объемная плотность и истинная плотность керамического черепка. Для плотных бетонов эта зависимость представлена графически на рис. 1.1. Согласно графику, уменьшение коэффициента уплотнения $k_{упл}^*$ с 0,98 до 0,95 снижает прочность бетона почти на 20%.

В рассматриваемом примере прочность является важной, но не единственной характеристикой материала. Для кирпича, например, водопоглощение, характеризующее открытую пористость, должно быть не менее 6% и не более 12...14%, а морозостойкость (также зависящая от пористости) — не менее 25 циклов. Поскольку требуе-

* $k_{упл} = \rho_f/\rho_t$, где ρ_f — фактическая плотность уплотненного бетона; ρ_t — теоретическая плотность, рассчитанная по расходу материалов на 1 м³ бетона.

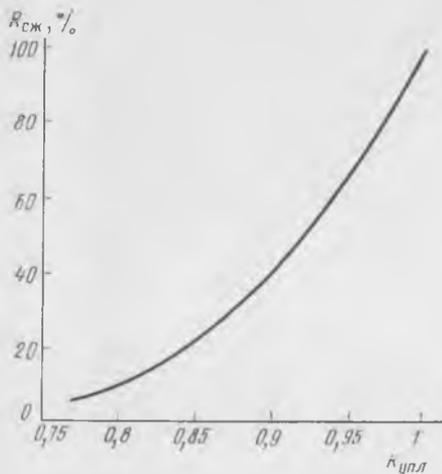


Рис. 1.1. Зависимость прочности бетона от степени уплотнения

мые водопоглощение и минимальная влажность формуемой массы — величины одного порядка, при формировании кирпича следует стремиться к получению массы максимальной плотности. Для железобетонных настилов перекрытий подобных ограничений по максимальной плотности нет, поэтому при их формировании также следует стремиться к получению изделий как можно более высокой плотности.

Тепловая обработка кирпича разделяется на два этапа: сушку и обжиг. После формирования изделия из глин обычно имеют влажность выше допустимой при обжиге. Задачей

сушки является удаление лишней воды в возможно короткие сроки без нарушения цельности сырца. Интенсивность сушки зависит как от свойств материала — его структуры, характера связи влаги с материалом, прочности и теплофизических свойств, так и от параметров теплоносителя — его температуры, относительной влажности и скорости перемещения относительно поверхности высушиваемого материала.

Оптимальный режим должен обеспечить получение изделий с заданной влажностью и без дефектов в возможно короткие сроки и с наименьшими затратами энергии.

При обжиге происходит удаление остаточной влаги, выгорание органических примесей, дегидратация глинистых минералов, модификационные превращения кремнезема, разложение карбонатов, реакции в твердом состоянии, появление жидкой фазы, спекание черепка и др.

В результате обжига керамические изделия приобретают необходимые свойства — прочность, водо- и морозостойкость и др. Дефекты обжига необратимы и поэтому в значительной степени определяют качество готовой продукции — ее сорт и размер брака.

Обычно на практике степень спекания керамического черепка характеризуют водопоглощением (рис. 1.2.). Поскольку водопоглощение лицевого керамического кирпича должно быть не менее 6%, обжиг сырца ведут при температуре 950... 1100°C в зависимости от вида используемого сырья. Режимы обжига характеризуются изменением температуры при обжиге (температурный режим) и газовой среды в печи во времени (газовый режим). Оптимальные температурный и газовый режимы для периодов нагрева, выдержки и охлаждения устанавливают опытным путем. Известно, что для обеспечения диссоциации карбонатов при обжиге в первый период

необходимо создавать сильно окислительную среду (избыток кислорода до 10%), а в конце обжига для обеспечения более полного спекания — восстановительную среду при избытке кислорода до 1%. Среда считается нейтральной при избытке кислорода 1,5 ... 2%, окислительной — 2 ... 3% и более.

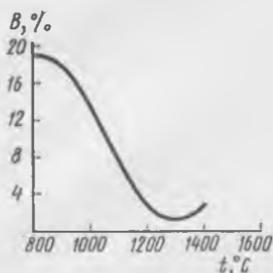


Рис. 1.2. Зависимость водопоглощения B керамического черепка от температуры t° обжига

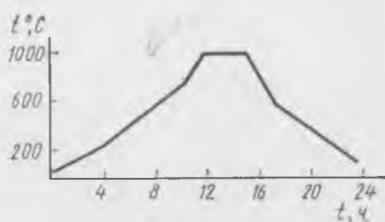


Рис. 1.3. Кривая обжига кирпича в туннельной печи

На рис. 1.3 представлена характерная температурная кривая обжига кирпича в туннельной печи. В конце зоны обжига на кривой показана температурная площадка при $t_{\text{const}} = t_{\text{max}}$. Выдержка при конечной температуре обжига обеспечивает выравнивание температур по сечению изделия и в садке кирпича. Она необходима для завершения процесса спекания. В этот период опасны как местные перегревы, которые вызывают размягчение и деформацию изделий, так и недостаточный прогрев, следствием которого является недожог отдельных участков садки или единичного изделия. В период остывания при температуре 600 ... 500°C спад кривой замедляется. Это вызвано модификационными превращениями кварца, которые при быстром охлаждении могут вызвать появление в изделиях мелких трещин.

Тепловую обработку бетона осуществляют пропариванием при нормальном или повышенном давлении (автоклавирование), электропрогревом или инфракрасным прогревом. При рассматриваемой нами технологии тепловую обработку настилов, как правило, производят при нормальном давлении в туннельных (щелевых) пропарочных камерах, где в качестве источников теплоты используется либо насыщенный водяной пар, либо ТЭНы. В обоих случаях среда должна иметь высокую относительную влажность, что предотвратит возможность пересушки бетона. Тепловая обработка имеет цель ускорить физико-химические процессы твердения минерального вяжущего.

Во время этой операции в бетоне протекают конструктивные и деструктивные процессы. Первые с повышением температуры выражаются в ускорении химических реакций взаимодействия вяжущего с водой. В результате в короткие сроки возникают те же цементующие новообразования, что и при нормальном твердении,

однако в более длительный период — через 7... 10 сут. Деструктивные процессы развиваются в бетоне в результате изменений температуры и влажности изделий в процессе тепловой обработки.

Если греющей средой является пар, то в период подъема температуры он конденсируется на поверхности изделия, увеличивая влажность наружных слоев. В результате в этот период в изделии возникают температурные и влажностные градиенты, вызывающие перемещение влаги внутри изделия. При охлаждении наружные слои изделия быстрее остывают и теряют влагу, чем внутренние слои. В этот период происходит миграция влаги от центра к поверхности, что способствует образованию в бетоне направленной капиллярной пористости и вредно отражается на ряде его свойств.

В обоих случаях — при нагревании и охлаждении — наличие градиентов температуры и влажности может привести к образованию трещин и нарушению контактов между цементным камнем и заполнителем. Поэтому оптимальным режимом пропаривания считается тот, при котором в возможно короткие сроки можно получить изделия с заданной прочностью при минимальных нарушениях в структуре бетона.

Продолжительность и максимальная температура основного периода — изотермической выдержки — определяется видом вяжущего вещества и водоцементным отношением (рис. 1.4).

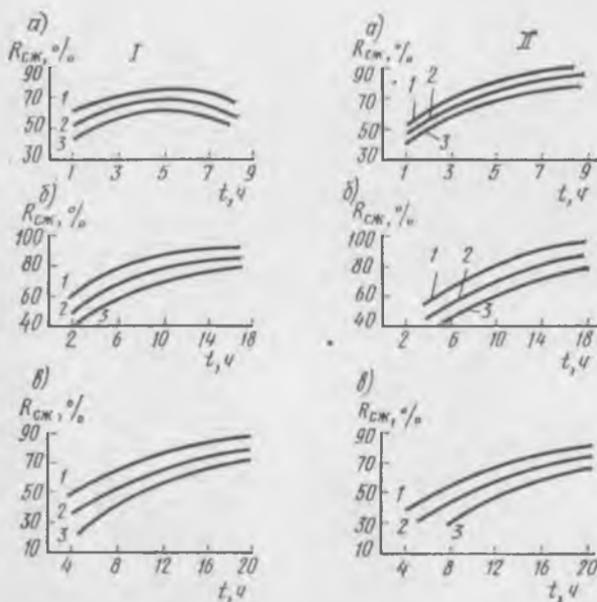


Рис. 1.4. Интенсивность нарастания прочности бетона $R_{сж}$ (% от R_{28} нормально-го твердения) при изотермическом прогреве:

I — бетон на портландцементе; *II* — то же, на шлакопортландцементе; *a* — прогрев при 100°C; *б* — то же, при 80°C; *в* — то же, при 60°C; 1 — В/Ц=0,4; 2 — В/Ц=0,5; 3 — В/Ц=0,6

Дополнительные операции при производстве кирпича в основном заключаются в забраковке изделий — частичной выборке недожога или пережога, а также изделий, имеющих нарушения фактуры. Для железобетонных настилов к этому технологическому переделу относятся операции по отделке поверхности, заделке раковин, сколов и т. п.

Перечень основных технологических переделов характерен и для производства других видов стройматериалов, — например для изделий из пластмасс, древесины и т. д.

В заключение необходимо подчеркнуть: выбор технологических режимов отдельных переделов специфичен не только для каждого конкретного вида изделия, но и часто предопределяется предыдущим переделом. Он также зависит как от свойств самого материала на данной стадии переработки, так и свойств окружающей среды. Например, высокое водоцементное отношение и большое водосодержание смеси предопределяет выбор перемешивающего агрегата (бетономеситель свободного падения), назначение мягких режимов тепловой обработки при удлиненном периоде изотермической выдержки. Наличие на предприятии пропарочных камер системы Семенова, где тепловлажностная обработка осуществляется в среде насыщенного водяного пара при температуре 100°С, ограничивает применение обычного и быстротвердеющего портландцементов и дает возможность применять более дешевые шлако- или пуццолановые портландцементы.

§ 1.2. Классификация основных процессов

Классификация основных процессов в технологии строительных материалов может быть проведена на основе различных признаков.

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

1. *Механические процессы*, основой которых является механическое воздействие на исходные материалы, описываемое законами механики твердых тел. К механическим процессам относятся измельчение, классификация (сортировка), смешение и транспортировка твердых компонентов. Эти процессы применяются в основном для подготовки сырья и в некоторых случаях при конечной обработке готового продукта (шлифовка облицовочного естественно камня).

2. *Гидромеханические процессы*, скорость которых определяется законами гидродинамики — наукой о движении жидкостей и газов. Движущей силой процесса является гидростатическое и гидродинамическое давление. К гидромеханическим процессам относятся перемещение и перемешивание жидкостей и газов, разделение жидких неоднородных систем под действием сил тяжести и центробежных сил (отстаивание и центрифугирование), а также движение твердых тел в жидкости или газе (например, приготовление литых керамических масс, движение дымовых газов в сушилках, центрифугирование бетонной смеси, сушка в кипящем слое и во взвешен-

ном состоянии (последние примеры можно отнести и к тепловым и массообменным процессам).

В общем случае отнесение той или иной технологической операции к элементарному процессу зависит от его целенаправленности. Поскольку процесс сушки заключается в диффузионном удалении влаги, его включают в класс массообменных процессов. Однако скорость осаждения (или витания) частиц подчиняется законам гидродинамики, что необходимо учитывать при расчетах и конструировании аппаратов для сушки в кипящем слое или во взвешенном состоянии.

3. *Тепловые и массообменные процессы*, скорость которых определяется законами теплопередачи — науки о способах распространения теплоты, и законами молекулярной диффузии. В технологии строительных материалов эти процессы, как правило, протекают одновременно. Типичным примером таких процессов является сушка. Как уже указывалось, удаление влаги из материала подчиняется законам массообмена. Однако в целях ускорения этого процесса материал обычно нагревают. Скорость же передачи теплоты от греющего агента (теплоносителя) к поверхности материала и скорость распространения теплоты в среде самого материала определяются законами теплопередачи. Скорость самих тепловых процессов в значительной степени зависит от гидродинамических условий (скоростей и режимов течения греющего агента), при которых осуществляется перенос теплоты. Поэтому, хотя сушка и относится к массообменным процессам, при конструировании сушильных установок приходится учитывать законы гидродинамики и теплопередачи.

4. *Химические процессы*, протекающие со скоростью, определяемой законами химической кинетики. Получение многих строительных материалов связано с различными химическими превращениями исходных компонентов. Таковы, например, реакции полимеризации и поликонденсации в технологии органических строительных материалов, реакции гидратации при твердении цемента. Эти процессы изучаются в специальных химических курсах и в данном курсе не рассматриваются. В отдельных разделах курса разбирается лишь влияние ряда физико-химических и химических процессов на протекание механических, гидромеханических и массообменных процессов и на отдельные стадии технологического процесса.

Например, поверхностные явления, образование структур в дисперсных системах, явления тиксотропии и т. п. оказывают влияние как на скорость протекания элементарных процессов, так и на выбор технологических режимов отдельных переделов технологии.

По способу организации основные процессы в технологии строительных материалов подразделяются на периодические и непрерывные. Исторически, как правило, периодические процессы предшествуют непрерывным. Чаще всего это объясняется малыми масштабами производства.

Периодические процессы проводятся в установках, характеризаемых тем, что все стадии процесса протекают в одном месте, но

в разное время. Примером может служить автоклавная обработка бетона — типичный химический процесс, связанный с гидратацией вяжущего, осложненный массообменными (первоначальным увлажнением с последующим испарением влаги в конце процесса) и теплообменными процессами (нагревом и охлаждением материала). Технология автоклавной обработки состоит из следующих стадий: загрузки автоклава, подъема температуры с одновременным подъемом давления в автоклаве, изотермической выдержки, охлаждения и выгрузки. Изделия во время автоклавирования находятся на месте и в разные временные периоды подвергаются различным температурным воздействиям. По окончании автоклавирования все технологические операции повторяются.

Таким образом, периодические процессы характеризуются неустановившимся состоянием во времени, т. е. в любой точке массы обрабатываемого материала или в любом сечении аппарата отдельные физические величины или параметры (концентрация гидратированных минералов цементного клинкера в растворе, температура материала и среды автоклава, давление в автоклаве, теплоемкость материала и др.), характеризующие процесс и состояние вещества, подвергающегося переработке, меняются во времени.

Непрерывные процессы характеризуются единством времени протекания отдельных стадий процесса, но осуществляемых в разных местах установки или в разных установках, выполняющих одну технологическую операцию. Вследствие установившегося состояния в любой точке массы обрабатываемого материала при любом сечении непрерывно действующего аппарата физические величины или параметры в течение всего времени протекания процесса остаются неизменными. Характерным примером такого процесса может служить тепловлажностная обработка бетона в щелевых пропарочных камерах. Как и в первом примере, процесс химический, осложненный массообменными и тепловыми процессами. В любой период времени характеристика среды и обрабатываемой массы в определенной точке установки остается практически постоянной (при правильной организации технологического процесса).

Непрерывные процессы имеют значительные преимущества перед периодическими: большую производительность, возможность специализации аппаратуры для каждой стадии процесса, стабилизации процесса во времени, улучшение качества готового продукта или полуфабриката, возможность осуществления полной механизации и автоматизации, что позволяет сократить, а во многих случаях и вообще исключить применение ручного труда. Поэтому в настоящее время во всех отраслях техники стремятся перейти от периодических к непрерывным производственным процессам.

Периодические и непрерывные процессы характеризуются продолжительностью (t) и периодом (T). *Продолжительность процесса* — время, необходимое для завершения всех стадий процесса, начиная от момента загрузки и кончая выгрузкой готового продукта или полуфабриката. *Период процесса* — время от начала загрузки исходного материала данной партии до начала загрузки материала

последующей партии. Частное от деления продолжительности процесса на период процесса (t/T) носит название *степени непрерывности процесса*. Для периодического — период процесса $T > 0$ и степень непрерывности $t/T \leq 1$. Для непрерывного — период процесса $T \rightarrow 0$ и степень непрерывности $\rightarrow \infty$.

Поясним эти положения следующим примером. Пусть одинаковые железобетонные изделия одного и того же состава бетона пропариваются в первом случае — в туннельной камере периодического действия, во втором — в туннельной камере непрерывного действия, причем температура и влажность среды в обоих случаях одинаковы. Время пребывания изделий в камерах (t_1 и t_2) определяется скоростью химических реакций компонентов цементного клинкера и допустимым темпом нагрева и охлаждения изделий. Для получения изделий одинакового качества (в данном случае одинаковой прочности) время тепловлажностной обработки должно быть одинаковым, т. е. $t_1 = t_2$. Тогда для периодической камеры продолжительность процесса

$$t_n = t_1 + t'_3 + t'_в, \quad (1.1)$$

где t'_3 и $t'_в$ — время, необходимое для загрузки и выгрузки камеры. Период процесса

$$T_n = t_1 + t'_3 + t'_в, \quad (1.2)$$

т. е. $t_n = T_n$ и степень непрерывности

$$t_n/T_n = 1. \quad (1.3)$$

На практике степень непрерывности периодической камеры меньше 1, поскольку требуется дополнительное время на закрывание и открывание дверей камеры, а иногда и на ее чистку. Для камеры непрерывного действия $t_n = t_2 + t''_3 + t''_в$, т. е. $t_n \rightarrow t_2$ и $T_n \rightarrow 0$, тогда $t_n/T_n \rightarrow \infty$.

Комбинированные процессы представляют собой либо непрерывный процесс, отдельные стадии которого проводятся периодически, либо такой периодический процесс, одна или несколько стадий которого проводятся непрерывно. Эти процессы встречаются и в технологии строительных материалов.

Различие между периодическими и непрерывными процессами касается только способа организации самого процесса и его аппаратного оформления. Физико-химическая сущность процесса неизменна и не зависит от конструкции агрегата. Так, в рассмотренном примере назначение процесса — ускорение гидратационного твердения минерального вяжущего — не зависит от того, в каком аппарате оно происходит: в туннельной пропарочной камере периодического действия или в туннельной пропарочной камере непрерывного действия.

§ 2.1. Основные принципы системного анализа

Научно-технический прогресс основан на тесной взаимосвязи теории и эксперимента. Чем быстрее развивается теория и чем больше накапливается научной информации, тем быстрее должны развиваться экспериментальные методы и тем более тонкими и обобщающими они должны быть. Эксперимент был и остается существенным инструментом познания. Для инженера эксперимент не только облегчает подход к изучению той или иной проблемы, но и является средством конкретного решения технических задач. В. И. Ленин писал: «От живого созерцания к абстрактному мышлению и от него к практике — таков диалектический путь познания истины, познания объективной реальности»*.

Главное в научном исследовании состоит не только в собирании фактов и их обобщении, но и в выявлении причин осуществления этих фактов, их природы, связи и зависимости от других фактов и явлений. Поэтому каждая частная методика исследований в конкретной области техники должна обязательно предусматривать изучение процессов в статике (граничных состояниях), кинетике (выявление характера движущих сил) и динамике (изменение параметров во времени под действием движущих сил). Совместное изучение статики процессов, их кинетики и динамики дает возможность установить взаимосвязь между предшествующей и последующей ступенями процесса, установить причины, побуждающие развитие как отдельных стадий, так и процесса в целом.

Современный подход к решению технологических задач основан на принципах системного анализа. Согласно этим принципам технологический процесс рассматривается как сложная система, состоящая из элементов различных уровней детализации, начиная от молекулярного и кончая отдельным процессом.

Сущность системы невозможно понять, рассматривая только свойства отдельных элементов; для нее еще существен как способ взаимодействия элементов между собой, так и взаимодействие элементов или системы в целом с окружающей средой. Анализ элементарных процессов, производимый порознь, не дает еще возможности судить о какой-либо стадии технологического процесса в целом, точно так же, как и анализ отдельных стадий процесса без выявления взаимосвязи между ними и с окружающей средой, не дает возможности судить о всем технологическом процессе.

При анализе технологического производства (цеха, завода, комбината) принято выделять несколько уровней иерархии, между которыми существуют отношения соподчинности. На первом уровне находятся элементарные процессы технологии (химические, массообменные, тепловые, механические, гидромеханические) и на более высоких — элементы, которые могут быть выделены в таковые

* Ленин В. И. Полн. собр. соч., т. 29, с. 152.

по какому-либо признаку, например по административно-хозяйственному или производственному (цеха, производства, предприятия и т. д.). При анализе отдельного процесса в качестве элементов или ступеней иерархии могут выступать явления на макро- и микроуровнях, в совокупности определяющие целевую функцию процесса, например химическое превращение, теплообмен и т. д. Основная идея системного анализа как раз и состоит в применении общих принципов разделения (декомпозиции) системы на отдельные элементы и установление связей между ними, в определении цели исследования и определения этапов для достижения этой цели.

Предметом изучения данного курса являются следующие системы: элементарные процессы; основные стадии технологического процесса, как правило, представляющие собой совокупность нескольких элементарных процессов; технологический процесс производства материалов в целом, а также сам результат производства — строительный материал как система.

Системный подход к исследованию технологических процессов имеет цель получения оценок функционирования процесса на любом уровне декомпозиции и осуществляется в несколько этапов. Отдельный элемент системы в зависимости от поставленной цели может рассматриваться как отдельная система с более детализованными уровнями декомпозиции.

Академик В. В. Кафаров выделяет четыре основных этапа системного исследования процесса.

1. *Смысловой и качественный анализы* объекта производятся для выявления уровней декомпозиции, отдельных элементов и связей между ними. Установление уровней иерархии, выбор элементов осуществляются исходя из общей цели исследования и степени изученности процесса.

2. *Формализация имеющихся знаний об элементах и их взаимодействии* и представление этих знаний делается в виде математических моделей. Источником знаний обычно служат фундаментальные законы и экспериментальные данные. Создавая математическую модель исследователь формализует рассматриваемый процесс, представляя его в виде математической связи между входными и выходными параметрами. Точность воспроизведения сущности рассматриваемого процесса на модели будет зависеть от степени изученности его.

3. *Математическое моделирование* как метод исследования (классификация моделей и общие принципы моделирования изложены ниже) в настоящее время получил широкое распространение. Его применение непосредственно связано с ЭВМ. Сочетая достоинства теоретических и экспериментальных методов исследования, математическое моделирование позволяет не только исследовать явления, недоступные этим методам (в силу сложности математического описания или невозможности технической реализации), но и обобщать результаты на основе многократного использования модели и делать прогнозы о возможном поведении процесса при изменении определяющих параметров. Математическое моделирова-

ние — это воспроизведение реально протекающих явлений на модели. Адекватность, т. е. соответствие результатов моделирования экспериментальным данным, полученным на реальном объекте, определяется уровнем знаний о процессе и обоснованностью принятых допущений. Математическая модель представляет собой совокупность математического описания и алгоритма решения (рис. 2.1). Алгоритм должен быть доведен до конкретной реализации, т. е. до получения количественной связи между параметрами в результате выполнения программы на ЭВМ.

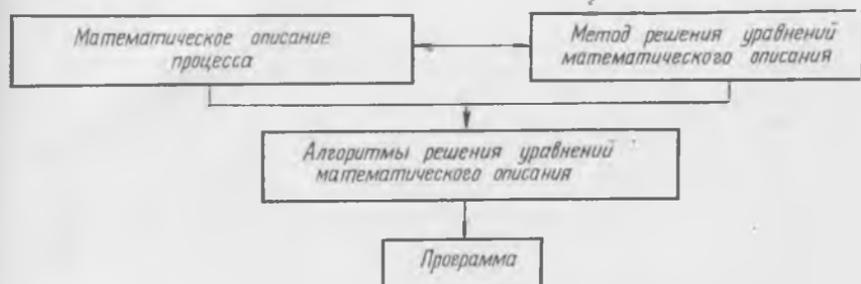


Рис. 2.1. Структура математической модели

4. *Идентификация математических моделей элементов* состоит в определении неизвестных параметров и оценке параметров состояния объекта.

Явления, определяющие процессы химического превращения, диффузионного, конвективного и турбулентного переноса вещества, распределения материальных и тепловых потоков по своей природе, являются вероятностными. Детерминированные фундаментальные законы отражают лишь общий характер явления при совокупности ограничений и допущений. И в то же время, являясь основным аппаратом при построении математических моделей процесса, для решения конкретной задачи они нуждаются в количественных оценках вероятности свершения акта взаимодействия на микро- и макроуровнях.

Получить более реальные характеристики процесса можно лишь после проведения коррекции параметров модели исходя из заданного критерия, по экспериментальным данным. Идентификация математической модели является одной из основных задач моделирования технологических процессов, и ее решение, особенно для нелинейных систем, практически невозможно без применения ЭВМ.

Итак, рассматривая технологический процесс как сложную систему, необходимо учитывать взаимодействие ее с внешней средой и внутренние взаимодействия отдельных элементов системы. На рис. 2.2 представлена схема внешних связей системы (прямоугольник — символ самой рассматриваемой системы). Внешние воздействия, оказываемые на систему, — *входы*, или *факторы*, — обозначены через h , x , z . Результаты функционирования системы, т. е. воз-

действия системы на внешний мир, — *выходы*, или *отклики* (имеется в виду отклик системы на взаимодействие факторов), — обозначены через y . В зависимости от конкретных задач обычно к выходам относят такие показатели, как производительность, качественные показатели продукта, экономические показатели функционирования системы и т. д.

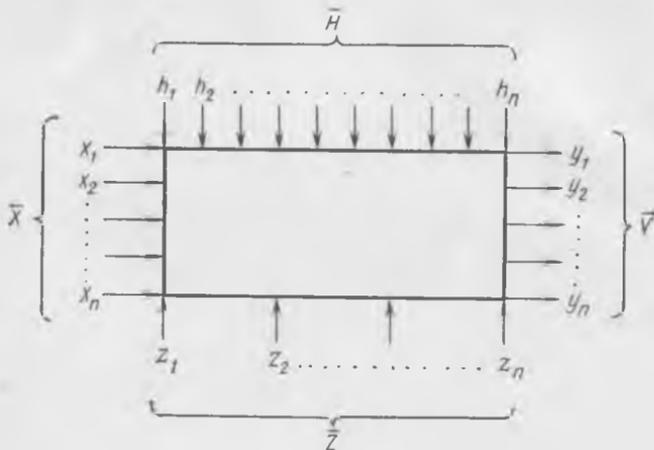


Рис. 2.2. Схема внешних связей системы:

$h_1, h_2, \dots, h_n; x_1, x_2, \dots, x_n; z_1, z_2, \dots, z_n; y_1, y_2, \dots, y_n$ — внешние связи; $\bar{H}, \bar{X}, \bar{Z}, \bar{Y}$ — их векторы; $\bar{H}, \bar{X}, \bar{Z}$ — входы; \bar{Y} — выходы; \bar{H}, \bar{X} — контролируемые; \bar{Z} — неконтролируемые; \bar{H} — контролируемые и регулируемые; \bar{X} — контролируемые не регулируемые

Часто для краткости совокупность факторов $h_1, h_2, \dots, h_n; x_1, x_2, \dots, x_n; z_1, z_2, \dots, z_n; y_1, y_2, \dots, y_n$ обозначают соответственно через $\bar{H}, \bar{X}, \bar{Z}, \bar{Y}$ и называют *векторами факторов* h, x, z, y . Пусть из трех ($\bar{X}, \bar{H}, \bar{Z}$) входов \bar{H} и \bar{X} *контролируемые*, т. е. воздействия на систему мы контролируем (измеряем) в процессе ее функционирования. При этом факторы \bar{X} — *контролируемые*, но не *регулируемые*, т. е. известные (измеряемые), но не изменяемые произвольно. Нерегулируемость части входов может быть связана с трудностью регулирования. Например, практически невозможно изменить соотношение диаметра и длины сушильного барабана в процессе его работы. Однако это было бы крайне желательным при изменении, например, размера и влажности сушимого материала, для обеспечения максимальной производительности. Иногда организовать регулирование технически возможно, но это настолько усложняет систему управления процессом, что предпочитают оставлять нерегулируемыми те из факторов, которые влияют слабее прочих.

Контролируемые и регулируемые входы (вектор \bar{H}) — это те воздействия, которые изменяют, чтобы управлять системой. Поэтому их обычно называют *управляющими факторами* или *управлениями*.

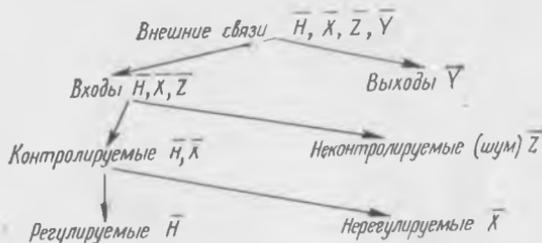
И наконец, *неконтролируемые факторы* (вектор \bar{Z}) — воздействия на систему, которые находятся вне нашего контроля. Причины неконтролируемости факторов могут быть различны:

1) объект может быть плохо изучен, поэтому неизвестно, что данный фактор существенно влияет на функционирование системы;

2) мы можем просто не уметь контролировать какой-либо фактор, хотя и знаем, что он существенно влияет на работу системы. Наиболее характерный пример этому — индивидуальность и душевное состояние человека, работающего с системой. Например, бетоносмесительное отделение завода оснащено автоматизированными дозаторами компонентов бетонной смеси со звуковой или световой сигнализацией о выходе из строя системы дозирования. Оператор либо по своей индивидуальности, либо по сегодняшнему душевному состоянию не смог своевременно среагировать на оповещение системы. Результат — случайное нарушение состава бетонной смеси, влекущее за собой изменение одного из выходных параметров вектора \bar{Y} — качественных характеристик изделия (бетона);

3) наиболее распространенная причина, по которой не контролируется множество входных воздействий: каждое воздействие из этого множества слишком слабо, чтобы его стоило контролировать. С другой стороны, воздействий так много, что все их контролировать практически невозможно, а совокупность воздействий может оказаться весьма ощутимой. Это влияние носит *случайный характер*: не контролируя входы \bar{Z} , невозможно предугадать, как они повлияют на выходные факторы системы в тот или иной момент. Обычно влияние неконтролируемых факторов называют *шумом*. Его учет необходим в большинстве технологических задач. Источник шума может быть заложен и внутри системы, но он все равно отражается на выходах системы. Влияние шума на производстве проявляется в случайных возмущениях режима, в экспериментальных исследованиях — в случайных ошибках опытов.

Более наглядно классификацию внешних связей системы можно представить в виде следующей схемы:



Математическое описание функционирования системы в общем виде представляют системой уравнений типа

$$y_i = f_i(\bar{H}, \bar{X}, \bar{Z}). \quad (2.1)$$

Принципиально каждое из уравнений определяет зависимость i -го выхода от всех входных воздействий. Поскольку факторы \bar{Z} не

известны, установить вид функции f_i невозможно. Тогда прибегают к такому приему: с большой или меньшей степенью приближения систему уравнений (2.1) представляют в виде

$$y_i = \varphi_i(\bar{H}, \bar{X}) + \psi_i(\bar{Z}) \quad (2.2)$$

с последующим установлением вида функции φ_i и оценки шума ψ_i .

Часто под математической моделью понимают именно совокупность функций $\varphi_i(\bar{H}, \bar{X})$, выделяя оценку шума в отдельную задачу (о которой надо всегда помнить, особенно при ответственных подходах к решению конкретных задач), т. е.

$$y_i = \varphi_i(\bar{H}, \bar{X}). \quad (2.3)$$

Исходя из обобщенной технологической схемы производства строительного материала (см. гл. 1), можно представить схему внешних связей технологического процесса как систему с детализацией по основным технологическим переделам. Эта схема представляет соединение как бы отдельных блоков (см. рис. 2.2), расположенных в технологической последовательности отдельных переделов, при этом отклики предыдущего блока представляют входы последующего. Выход предыдущего блока может быть как управляемым, так и неуправляемым входом последующего блока*. Обычно система упрощается исключением вектора \bar{Z} , т. е. математическая модель представляется системой уравнений типа (2.3).

Вид этой функции можно получить из двух разных подходов.

1. *Структурный подход.* Для создания математической модели системы исследуют составляющие систему элементы и характер их взаимодействия. Применительно к технологическому процессу это означает расшифровку его механизма не только на стадии блоков по рис. 2.3, но и на более низком уровне — не выше элементарных процессов. Например, для процесса производства сборного железобетона такая модель на физическом языке содержит прежде всего представления о механизмах реакции гидратации, характера движения потоков, процессах переноса теплоты и вещества и о их взаимном влиянии. Записав эту схему на языке математики, получают в общем виде систему уравнений (описывающих процесс), в которую входят некоторые пока еще не известные коэффициенты (тепло- и массопереноса, константы скорости реакций и т. д.), которые называют *параметрами модели*. Их устанавливают экспериментально. К сожалению, в технологии строительных материалов таких уравнений в полном объеме пока еще нет.

2. *Эмпирический подход* (или метод *черного ящика*) заключается в следующем. Допустим, что внутренние взаимосвязи рассматри-

* Принципиально возможен переход $\bar{Y}_{\pi_{i-1}(2,3)}$ не только на $\bar{X}_{c_{i-1}(2,3)}$ или на $\bar{H}_{c_{i-1}(2,3)}$, но и на $\bar{Z}_{c_{i-1}(2,3)}$. Однако на практике при решении отдельных блоков переходная связь типа $\bar{Y}_{\pi_{i-1}(2,3)} \rightarrow \bar{Z}_{c_{i-1}(2,3)}$ не осуществляется, поскольку в этом случае $\bar{Y}_{\pi_{i-1}(2,3)}$ как случайная величина из откликов исключается.

вают системы, скрытые от нас (они как бы заключены в черный ящик). Но это вовсе не значит, что о системе ничего невозможно узнать и главное что ею нельзя управлять. У такой системы есть важные контакты — входы и выходы, которыми можно воспользоваться для анализа и управления ею. Для этого нужно изменить значения входов и установить, как при этом будут изменяться выходные параметры. Установление каждой такой зависимости есть не что иное, как эксперимент. Проведя определенное количество экспериментов, результаты их можно описать эмпирическим уравнением (или системой уравнений), которое и будет математической моделью системы.

Долгое время в науке господствовало убеждение, что истинно научным является лишь структурный подход, а подход эмпирический — это нечто неполноценное, второстепенное вспомогательное, нечто такое, что пригодно лишь в практических задачах, а также на начальном этапе научного исследования; истинная же наука начинается с установления механизма, с расшифровки структуры. Одним из плодотворных положений кибернетики является утверждение того, что во многих задачах метод черного ящика может оказаться основным способом исследования, что это полноценный научный метод и что в каждом конкретном случае надо оценить преимущества и недостатки обоих подходов.

Необходимо подчеркнуть, что в любом реальном случае имеются элементы того или иного подхода.

Как бы хорошо ни был изучен объект исследования, в достаточно трудных случаях его реальное описание нельзя построить на чисто теоретической основе. Какие-то параметры всегда придется определять опытным путем. Мало того, опытом же придется и проверять соответствие между построенной моделью и оригиналом, т. е. адекват-

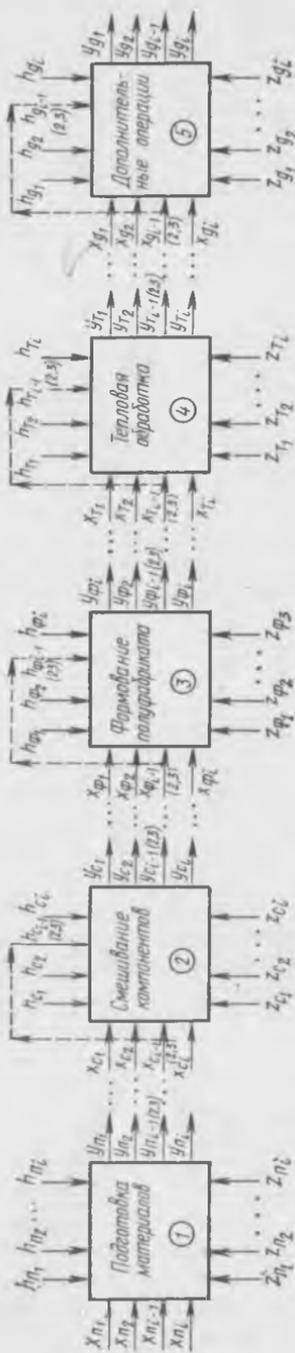


Рис. 2.3.. Блок-схема внешних связей технологического процесса производства строительного материала

ность модели. В то же время любое эмпирическое описание обязательно отражает механизм исследуемого процесса. Поэтому в практических задачах при рассмотрении системы применяются как фундаментальные уравнения (структурный подход), так и экспериментально выведенные зависимости (эмпирический подход).

Основным достоинством эмпирического метода является простота. Особенно существенно она сказывается при изучении сложных процессов. Например, рассмотрим бетон как систему. Внешние связи этой (как и всякой другой) системы состоят из контролируемых и регулируемых входов — состав, ряд технологических параметров (время перемешивания и вибрирования смеси, температура и длительность тепловлажностной обработки и т. д.), контролируемых, но не регулируемых входов — активность цемента, зерновой состав заполнителей (что поступило на завод, то практически и надо использовать), некоторые технологические параметры (например, амплитуда колебаний бетонной смеси), ряд эксплуатационных воздействий (например, температурные условия службы бетона), случайные входы — химическая загрязненность сырья, большинство эксплуатационных воздействий и т. п.

Откликами этой системы, как правило, являются прочностные, деформативные, теплофизические характеристики материала и его долговечность. В настоящее время мы многое знаем о влиянии входов на выходные факторы, например $R_{\sigma} = \varphi(R_{\text{ц}}; B/C)$; $R_{\sigma} = f(t, t^{\circ})$; $R_{\text{мрз}} = \psi(R_{\sigma}; B/C; c)$ и т. д., где R_{σ} и $R_{\text{ц}}$ — соответственно прочность бетона и цемента; B/C — водоцементное отношение; $R_{\text{мрз}}$ — морозостойкость бетона; t и t° — соответственно продолжительность и температура твердения бетона; c — объемная концентрация цементного теста в бетоне.

Все эти зависимости получены в результате эксперимента. Общий механизм процесса создания материала и обобщенные зависимости его свойств от основных факторов, по существу, находятся на стадии качественного описания. Возможности количественной оценки на основе фундаментальных уравнений физики, химии, термодинамики в настоящее время лишь намечаются на базе характеристик, связывающих состав — структуру — свойства.

Если бы мы исходили из возможностей только структурного подхода, то и сегодня вряд ли бы имели не только такие уникальные сооружения, как Братская и Роугунская ГЭС, но и просто жилье, кинотеатры и другие гражданские сооружения.

Главная слабость экспериментального подхода — малая надежность экстраполяции. В пределах изменения переменных, изученных в опытах, предсказание поведения процесса (интерполяция) обычно может проводиться достаточно точно. Но закон изменения функций отклика за изученными пределами нам не известен, и можно допустить серьезную ошибку, полагая, что процесс по-прежнему обязательно будет подчиняться выведенным нами эмпирическим уравнениям. Например, при производстве фенолформальдегидного пенопласта скорость поликонденсации зависит от температуры. Ес-

ли эксперимент проводят в интервале температур 120...170°C, то экстраполяция этих результатов за температурные пределы 180...200°C приведет к абсурдным результатам, поскольку при этих температурах реакция поликонденсации не только не ускорится, а, наоборот, произойдет деструкция полимера. Разумеется, ситуация упрощена: в столь явных случаях эмпирический подход вряд ли стоит применять. Но пример не столь уж бессмыслен. Именно температурные зависимости очень часто плохо поддаются экстраполяции.

В практике экспериментальных исследований одним из важнейших случаев экстраполяции является масштабирование: предсказание того, как изменятся параметры процесса при переходе от малой модели к большому оригиналу. На основе эмпирических зависимостей эта задача, как правило, решается гораздо хуже, чем при структурном подходе.

Главное достоинство данных, полученных на основе структурного подхода, — это их большая вероятность правильного прогнозирования. Зная механизм какого-либо процесса, мы можем с большой степенью достоверности предсказывать его поведение в самых разнообразных условиях.

Слабое место подхода — трудность создания хорошей теории сложных процессов.

Объекты, представляющие для нас значительный интерес, длительный во времени, структура которых не слишком сложна, целесообразно исследовать на базе структурного подхода. Так, для важнейшего технологического передела при производстве керамических материалов — сушки — нужно как можно подробнее исследовать механизм, создать математические модели, отражающие все детали структуры. Результаты окупят затраты. Тот же подход оптимален для сравнительно простых процессов. В то же время некоторые процессы, например перемешивание компонентов какого-либо нового материала, для чего предложен новый тип мешалки смесителя, не стоит и пытаться описать с этих позиций: процесс столь сложен, что, пока мы расшифруем его кинетику, либо материал, либо сам смеситель морально устареет. Здесь лучше быстро научиться управлять процессом, считая его черным ящиком.

Если процесс и важен, и сложен, бывает полезно разбить его изучение на этапы: на первом — изучать его эмпирически, что облегчает быстрое освоение; на втором — проводить углубленное изучение механизма, которое позволит улучшить результаты, полученные ранее. Именно этим путем и идут исследователи, разрабатывающие общую технологию бетона.

§ 2.2. Метод подобия как основа исследования

Многообразие материального мира требует применения самых разнообразных способов его изучения. Одним из основных приемов разработки общих теоретических положений является обобщение.

Обобщение — есть средство перехода от познания частных явле-

ний к познанию общих. Оно заключается в исследовании таких свойств и явлений материального мира, которые характеризуют не единичное явление, а целый класс однородных в данном отношении явлений. Обобщение имеет огромное значение в теории подобия для выделения из класса однородных явлений *группы подобных* между собой явлений. Изучив одно из подобных явлений, результаты исследования можно распространить на всю группу подобных явлений данного класса.

Теория подобия — есть учение о методах научного обобщения эксперимента. Она отвечает на вопрос, как нужно поставить опыт и обработать полученные данные, чтобы их можно было распространить на все подобные явления.

Всякое явление природы представляет собой систему материальных тел, которая за счет протекания в ней различных процессов претерпевает определенное изменение состояния.

Подобными явлениями называют системы тел, геометрически подобные друг другу, в которых протекают процессы одинаковой природы и в которых одноименные величины, характеризующие явления, относятся между собой как постоянные числа. Принцип выделения группы подобных явлений из класса однородных можно уяснить на простом примере. Из класса однородных аппаратов (допустим, барабанных сушилок) выделяют группу подобных аппаратов (рис. 2.4), отличающихся только масштабом. Если аппарат и его модель геометрически подобны, то $L_2 = cL_1$ и $D_2 = cD_1$, т. е. для данной пары аппаратов величина масштабного множителя $c = \text{const}$.

При изучении процесса в модельной сушилке, например в сечениях 1—1 и 2—2 на расстоянии l от загрузочного конца барабана,

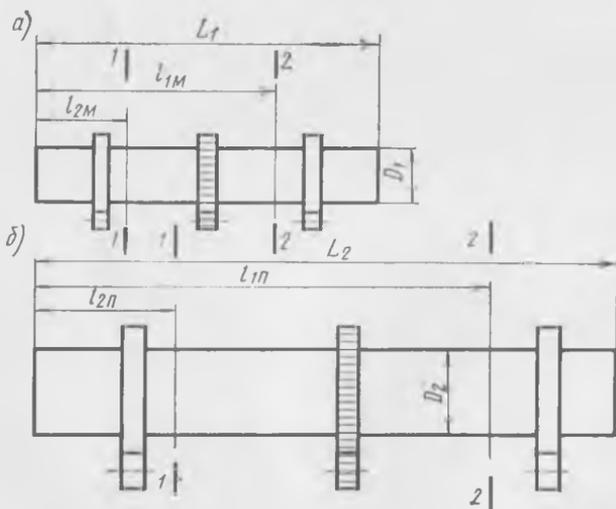


Рис. 2.4. Геометрическое подобие барабанных сушилок:

a — модель; *б* — промышленный аппарат

геометрическую сходственность точек модели и промышленного аппарата определяет равенство $l_{1M} = c l_{1П}$ и $l_{2M} = c l_{2П}$.

При рассмотрении каких-либо подобных технологических процессов имеют в виду их физическое подобие, т. е. подобие всех физических величин, характеризующих данные процессы. Два подобных процесса из группы однородных отличаются только масштабом физических величин, поэтому для каждой из них (например, скорости v , силы F , теплоемкости c , времени t и др.) существует свой множитель, посредством которого физические величины одного процесса ($v_1; F_1; c_1; t_1$) можно выразить через сходственные величины второго процесса ($v_2; F_2; c_2; t_2$). Процессы, отличающиеся физической сущностью, характеризуются различными физическими величинами. В приведенных примерах v является одной из величин, характеризующих кинематическое подобие, F — динамическое, c — тепловое, t — временное и т. д.

Выделяя из конкретного класса группу подобных процессов, различают подобие между собой механических процессов, теплопередачи, физико-химических процессов и т. д. Если сложный технологический процесс складывается из разнородных взаимосвязанных явлений (например, изготовление погонажных изделий из синтетических смол в экструдерах есть совокупность механического, гидравлического и теплового процессов), то рассматриваются условия подобия каждого из явлений в их взаимодействии и развитии во времени.

Математическую формулировку понятию подобия можно дать в виде следующей системы равенств:

$$l_2/l_1 = c_l; v_2/v_1 = c_v; F_2/F_1 = c_F; t_2/t_1 = c_t \text{ и т. д.} \quad (2.4)$$

Коэффициенты c_l, c_v, c_F, c_t и т. д. называются *константами подобия*. Для одного рода величин они имеют свое конкретное числовое значение, но различны для величин разного наименования: $c_l \neq c_v \neq c_F \neq c_t$.

В общем виде переход от X_1, \dots, X_i одного явления к X'_1, \dots, X'_i другого, ему подобного явления может быть выражен уравнением

$$X_i = c_{xi} X'_i, \quad (2.5)$$

где $1 < i < n$. Это первое основное уравнение теории подобия.

Подобие явлений можно выразить и другим способом — посредством *инвариантов подобия*. Для рассмотренного примера геометрического подобия можно записать

$$L_1/D_1 = L_2/D_2 = i_L = \text{const}, \quad (2.6)$$

где i_L — инвариант геометрического подобия, представляющий собой безразмерное отношение двух размеров малого барабана, равное отношению сходственных размеров подобного ему производственного барабана.

Инварианты подобия представляют собой выражение величин в относительных единицах. В приведенном примере один размер

(длина) подобных аппаратов выражен в относительных единицах. В качестве масштаба принят их другой размер (диаметр).

Следует различать понятия константа подобия и инвариант подобия. Константа сохраняет постоянное значение во всех точках системы, но она изменяется, когда одна пара подобных явлений заменяется другой парой той же группы. Инвариант подобия, наоборот, различен для разных точек системы (сравните $L_1/D_1=L_2/D_2=i_L$; $l_{1м}/D_1=l_{1п}/D_2=i_{i_1}$; $l_{2м}/D_1=l_{2п}/D_2=i_{i_2}$; но $i_L \neq i_{i_1} \neq i_{i_2}$), поскольку он изображает одну из величин этой системы, имеющую разное числовое значение в разных точках системы: но он не меняется при переходе от одного явления к любому другому, подобному ему, т. е. сохраняется одно и то же значение в сходственных точках всех групп подобных явлений.

Отметим еще одно важное свойство констант подобия: входящие в них одноименные величины могут *взаимно заменяться*, т. е. отношение самих величин можно заменять отношениями приращений этих же величин. Например:

$$c_i = t_2/t_1 = t'_2/t'_1 = (t_2 - t'_2)/(t_1 - t'_1) = \Delta t_2/(\Delta t_1) = dt_2/dt_1. \quad (2.7)$$

§ 2.3. Теоремы подобия. Метод анализа размерностей

Применение тех или иных методов подобия для решения конкретных практических задач определяется предварительными знаниями о процессе, которые имеет исследователь перед началом эксперимента. Обычно используют три основные теоремы подобия, так называемую π -теорему и метод анализа размерностей.

Первая теорема подобия (по Ньютону): подобные между собой явления имеют численно одинаковые критерии подобия. Покажем это на примере движения тел. Пусть в двух подобных системах происходит подобное движение тел, описываемое вторым законом Ньютона

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

где F — сила; m — масса; v — скорость; t — время. Тогда для первой и второй систем

$$F_1 = m_1(dv_1/dt_1); \quad F_2 = m_2(dv_2/dt_2).$$

У подобных систем физические величины одной системы можно выразить через физические величины второй системы, применив константы подобия. Следовательно, $F_1 = c_F F_2$; $v_1 = c_v v_2$; $t_1 = c_t t_2$; $m_1 = c_m m_2$.

Разделив исходные выражения одно на другое, получим

$$F_1/F_2 = (m_1/m_2)(dv_1/dv_2)(dt_2/dt_1). \quad (2.8)$$

Так как отношения самих величин можно заменить отношением приращений, то

$$dv_1 = c_v dv_2 \quad \text{и} \quad dt_1 = c_t dt_2. \quad (2.9)$$

Подставив значения (2.9) в выражение (2.8) и выразив через константы подобия, имеем

$$c_F = c_m c_v / c_t. \quad (2.10)$$

Преобразуя выражение (2.7) путем деления обеих частей на c_F , можно записать

$$c_F c_t / (c_m c_v) = 1. \quad (2.11)$$

Комплекс констант подобия $c_F c_t / (c_m c_v)$ называют индикатором подобия и обозначают буквой j . Из уравнения (2.11) следует весьма важный вывод: при выборе числовых значений констант подобия для группы подобных явлений необходимо соблюдение условия $j=1$, т. е. выбор значений констант подобия не произволен.

Основываясь на вышеизложенных рассуждениях, М. В. Кирпичев дал такую формулировку первой теоремы подобия: **у подобных явлений индикаторы подобия равны единице.**

Умножив обе части уравнения (2.8) на $F_2 t_1 / (m_1 v_1)$ и исходя из формулы (2.9), получим

$$F_1 t_1 / (m_1 v_1) = F_2 t_2 / (m_2 v_2). \quad (2.12)$$

Таким образом, для группы подобных явлений одного класса (в рассмотренном примере для двух подобных явлений) числовое равенство величин $Ft/(mv)$ сохраняется, т. е. $Ft/(mv) = inv$ (инвариантно, неизменно) = idem (одно и то же).

В честь Ньютона этот комплекс физических величин обозначен через Ne (Newton): $Ne \equiv Ft/(mv)$, т. е. Ne тождественно равно $Ft/(mv)$. Знак «тождество» показывает, что записано обозначение комплекса Ne, а не функция его от величин F, t, m, v .

Из сказанного следует, что для группы подобных процессов, описываемых уравнением второго закона Ньютона, справедливо равенство: $Ne_1 = Ne_2 = Ne_3 = \dots = Ne_n = idem$.

Комплекс Ne называется *критерием подобия*, так как признаком подобия группы процессов одного класса является равенство этих критериев. Критерии подобия представляют собой безразмерные обобщенные характеристики процесса, составленные из размерных физических величин. Так же как и исходное физическое уравнение, выведенный из него критерий подобия имеет определенный физический смысл. В приведенном примере Ne характеризует отношение действующей на частицу силы к силе инерции. Определенный физический смысл каждого критерия подобия отличает его от произвольно подобранных безразмерных комплексов из случайных физических величин. Из физических уравнений, отражающих явление разных классов, получают критерии подобия различных процессов — тепловых, гидравлических, механических, химических и др.

Уравнения более сложные, чем рассмотренное выше, дают сразу несколько критериев, которые характеризуют разные стороны процесса.

Получение критериев из исходных уравнений называется *подобным преобразованием*. Показанный здесь способ преобразования путем введения констант подобия не единственный.

Вторая теорема подобия (Федермана — Бэкингема): **количественные результаты опытов надо представлять в виде уравнений, выражающих зависимость между критериями подобия изучаемого процесса.** Критерий подобия K_1 , содержащий интересующую исследователя величину, должен быть выражен как функция других критериев $K_2, K_3, K_4, \dots, K_n$, отражающих различные стороны процесса:

$$K_1 = f(K_2, K_3, K_4, \dots, K_n). \quad (2.13)$$

Вторая теорема подобия может быть записана в виде дифференциального уравнения

$$f_1(K_1, K_2, K_3, \dots, K_n) = 0. \quad (2.14)$$

Такие уравнения называются *уравнениями обобщенных переменных (обобщенными) или критериальными уравнениями*. Таким образом, вторая теорема подобия содержит ответ на вопрос, как следует обрабатывать полученные экспериментальные данные или в какой форме может быть получено решение системы дифференциальных уравнений, описывающих процесс, с помощью методов теории подобия.

Следует отметить, что критерии подобия, входящие в зависимость типа (2.14), не равноценны. Критерии подобия, составленные из физических величин, входящих в начальные и граничные условия, точнее, в условия однозначности, — называются *определяющими*. Критерии, составленные из физических величин, не являющихся необходимыми для однозначной характеристики данного процесса и, в свою очередь, зависящие от этих условий, называются *определяемыми*. В выражении (2.13) K_1 является определяемым критерием, остальные — определяющими.

Какой из критериев является определяемым, зависит от формулировки задачи. Пусть подобные явления однозначно описываются критерием Ньютона и геометрическим критерием (допустим, $L/D = \Gamma$, как в рассмотренном случае с сушильным барабаном), т. е. $f_1(Ne, \Gamma) = 0$. Если по условиям задачи надо определить L , а величины, входящие в критерий Ne , известны, то определяемым будет геометрический критерий и уравнение (2.13) будет иметь вид

$$\Gamma = f(Ne). \quad (2.15)$$

Критерии подобия, составленные из разнородных физических величин (подобно критерию Ньютона), называются критериями *комплексами*; критерии, составленные из одноименных величин (например, L/D , где L — длина сушильного барабана и D — его диаметр), называются критериями *симплексами* или *параметрическими*. В общем случае вид функции (2.13) заранее неизвестен и определяется эмпирически при обработке экспериментальных данных.

Независимо от воли человека развитие природы следует законам геометрических прогрессий, логарифмов и вероятностных процессов, а логарифмическая зависимость чаще других определяет многие процессы физического и более общего характера; поэтому результаты опытов при обработке приобретают обычно форму либо степенную

$$K_1 = cK_2^m K_3^n K_4^p \dots, \quad (2.16)$$

либо экспоненциальную (для кинетики процессов):

$$K_1 = K_0 \exp(-t/\theta) \text{ (затухающий процесс);} \quad (2.17)$$

$$K_1 = K_0 [1 - \exp(-t/\theta)] \text{ (нарастающий процесс),} \quad (2.18)$$

где c, m, n, p, \dots — постоянные, найденные при обработке опыта; K_0 — начальное значение критерия K_1 при $t=0$ (или конечное при $t=\infty$); t — время от начала процесса; θ — постоянная времени процесса, зависящая от условий его проведения и также выражаемая через критерий подобия.

В практике важной особенностью метода подобия является то, что исходная система дифференциальных физических уравнений не решается аналитически, а используется для определения вида и числа критериев в функции (2.13).

Третья теорема подобия (Кирпичева — Гухмана) обратна первой: **подобны те явления или системы, которые описываются одинаковыми уравнениями связи и условия однозначности которых подобны.** Подобие условия однозначности обеспечивается равенством определяющих критериев подобия в случае, если явления или процессы качественно аналогичны. Качественно одинаковыми будут процессы, математическое описание которых одинаково.

Таким образом, третья теорема подобия формулирует необходимые и достаточные условия для подобия явлений или процессов. Она может быть сформулирована и так: **явления подобны, если их определяющие критерии численно равны.**

Требование условий однозначности при критериальном обобщении имеет тот же смысл, что и установление единственности (однозначности) аналитического решения физических дифференциальных уравнений. Дифференциальное уравнение описывает широкий круг явлений данного класса, основой которых является общий закон физики.

Инженера же интересует конкретное явление данного класса, наблюдаемое в условиях работы определенного аппарата. Поэтому из множества возможных решений исходного уравнения (или системы уравнений) надо выбрать одно, соответствующее исследуемому явлению, т. е. получить однозначное решение. Для этого в условия задачи вводят дополнительные условия однозначности (краевые условия), не содержащиеся в исходной системе уравнений и ограничивающие решение единственным конкретным случаем. Краевые условия включают: а) сведения о геометрических свойствах системы (конфигурация и размеры рабочего объема аппарата);

б) данные о физических свойствах продуктов и материалов, составляющих исследуемую систему (теплопроводность, теплоемкость стенок аппарата, вязкость, плотность рабочих сред и др.); в) данные о состоянии системы на ее границах (граничные, или пространственные, краевые условия) и о взаимодействии с окружающей средой (интенсивность теплоотдачи или массоотдачи, распределение температур или концентраций на поверхности и др.); г) данные о состоянии системы в начальный и конечный моменты времени процесса (временные условия).

Исходная система физических уравнений совместно с краевыми условиями однозначно определяет конкретное явление данного класса.

Теория подобия объединяет сильные стороны аналитического и экспериментального методов исследования. Аналитический метод дает исходное описание явлений в форме сложных дифференциальных уравнений, устанавливающих взаимосвязь между величинами при постановке задачи; решение их в виде зависимости между конечными величинами обычно не достигается из-за сложности задачи. Поэтому чисто аналитическое исследование часто остается только принципиальной возможностью, не реализуемой и не доводимой до практического инженерного решения. Чисто экспериментальный метод при всей достоверности результатов без исходных (даже не решенных) уравнений также не привел бы к положительному результату, так как для решения любой инженерной задачи пришлось бы ставить огромное количество опытов, отыскивая желаемый результат ценой многочисленных «слепых проб», наугад.

Теория подобия приводит к экспериментальному решению задачи, основой которого является физические законы в виде исходных уравнений процесса, причем переход к обобщенным переменным существенно облегчает и ускоряет это решение.

Каждое критериальное уравнение, несмотря на эмпирический способ его получения в явной форме, имеет определенный физический смысл, ибо оно является уравнением подобия и отражением законов природы, выраженных исходной системой физических уравнений. Это — неполное, приближенное отражение, учитывающее лишь важнейшие определяющие факторы процесса, обнаруженные на данной ступени его исследования.

При проведении экспериментальных исследований обычно удается установить функциональную связь между немногими, основными и существенно изменяющимися в процессе критериями подобия. Каждый из критериев обобщенного уравнения отражает одну какую-либо из основных сторон процесса, а все критериальное уравнение — весь процесс в целом.

Критерии подобия следует выводить не только из основного физического уравнения процесса, но и из уравнений условий однозначности. Подобие условий однозначности на границах системы и во времени процесса вызовет, как следствие, физическое подобие процессов во всем объеме системы. Подобие условий однозначности

выразится в совпадении для подобных процессов числовых значений критериев K_2, K_3, K_4 в выражении (2.16) и в одинаковой степени влияния этих критериев (т. е. в равенстве показателей степеней соответствующих критериев). Результатом подобия условий однозначности будет одинаковый вид функции и совпадение числовых значений искомого критерия K_1 для двух и ряда подобных процессов.

π -Теорема: всякое уравнение, связывающее между собой N физических величин, размерности которых выражаются через n основных единиц, может быть преобразовано в уравнение, связывающее π безразмерных критериев подобия, где

$$\pi = N - n. \quad (2.19)$$

В некоторых случаях из-за сложности явления или процесса не удастся составить его полное математическое описание в виде системы дифференциальных уравнений, а возможно лишь в самом общем виде представить зависимость между физическими величинами и геометрическими параметрами, характеризующими процесс. Вид такой зависимости можно найти на основе анализа размерностей физических величин, вошедших в уравнение. Этот метод, введенный в инженерную практику Бриджменом, базируется на так называемой π -теореме Бэкингема, являющийся частным случаем второй теоремы подобия.

π -Теорема имеет большое значение при проведении экспериментального исследования, позволяя находить связь не между отдельными физическими переменными, а между некоторыми их безразмерными соотношениями (K), составленными по определенным законам. При этом число переменных уменьшается на число использованных основных единиц измерения (1, 2, 3 и более), что существенно упрощает условия проведения эксперимента. Так, если рассматриваемое явление описывается в общем виде уравнением

$$f_1(\alpha, \beta, \gamma, \delta, \theta) = 0, \quad (2.20)$$

связывающим пять каких-либо физических величин, выражаемых тремя основными единицами измерения, то $N=5$ и $n=3$, тогда функциональная зависимость (2.20) может быть представлена в виде функции между некоторыми двумя безразмерными комплексами K_1 и K_2 :

$$f_1(K_1; K_2) = 0 \text{ или } K_1 = \varphi(K_2). \quad (2.21)$$

Метод анализа размерностей позволяет выразить общую функциональную зависимость для любого исследуемого процесса в виде уравнения связи между строго определенным числом безразмерных комплексов, состоящих из физических величин с определенной размерностью, выраженной с помощью основных единиц измерения. Этот метод базируется на двух допущениях: 1) известно заранее (из практических данных), от каких именно параметров процесса и переменных зависит рассматриваемая физическая величина; 2) связь между всеми существенными для исследуемого процесса

физическими величинами выражается в виде степенного многочлена.

В простейшем случае в уравнение связи подставляются размерности входящих в него физических величин и достигается размерная однородность. Соблюдение размерной однородности обеспечивает независимость уравнения от единиц измерения переменных, т. е. его инвариантность. Рассмотрим использование метода анализа размерностей на следующем примере. Пусть какой-либо процесс в общем виде описывается уравнением (2.20), причем размерности всех пяти величин выражаются единицами длины L (м), времени T (с) и массы M (кг).

Пусть, как это часто оказывается возможным при описании процессов, функция общего вида (2.20) может быть приближенно представлена в виде степенной зависимости между величинами α , β , γ , θ :

$$\alpha = x\beta^y\gamma^z\delta^m\theta^n, \quad (2.22)$$

где x , y , z , m , n — неизвестные числовые коэффициенты.

Выразим размерности величин α , β , γ , δ , θ в единицах длины, времени и массы:

$$\begin{aligned} [\alpha] &= [L^a T^b M^c]; & [\delta] &= [L^a T^b M^c]; \\ [\beta] &= [L^{a_1} T^{b_1} M^{c_1}]; & [\theta] &= [L^{a_2} T^{b_2} M^{c_2}]; \\ [\gamma] &= [L^{a_3} T^{b_3} M^{c_3}]; \end{aligned}$$

В этих выражениях размерностей показатели степени при L , T , M — некоторые определенные числовые величины.

Учитывая, что размерности обеих частей уравнения (2.22) одинаковы, а x — безразмерный коэффициент, заменим в нем все величины их размерностями

$$[\alpha] = [\beta]^y [\gamma]^z [\delta]^m [\theta]^n, \quad (2.23)$$

или при подстановке конкретного выражения размерности каждой величины

$$L^a T^b M^c = (L^{a_1} T^{b_1} M^{c_1})^y (L^{a_2} T^{b_2} M^{c_2})^z (L^{a_3} T^{b_3} M^{c_3})^m (L^{a_4} T^{b_4} M^{c_4})^n.$$

Раскрывая скобки в правой части этого уравнения и группируя однородные члены, получим

$$L^a T^b M^c = L^{a_1 y + a_2 z + a_3 m + a_4 n} T^{b_1 y + b_2 z + b_3 m + b_4 n} M^{c_1 y + c_2 z + c_3 m + c_4 n}.$$

Показатели степеней при одинаковых основных единицах в обеих частях уравнения должны быть равны. Поэтому

$$\begin{aligned} a_1 &= a_2 y + a_3 z + a_4 m + a_5 n; \\ b_1 &= b_2 y + b_3 z + b_4 m + b_5 n; \\ c_1 &= c_2 y + c_3 z + c_4 m + c_5 n. \end{aligned} \quad (2.24)$$

В этой системе из трех уравнений имеется четыре неизвестных: y, z, m, n . Любые три из них всегда можно выразить через четвертую. Например, выразив z, m и n через y , найдем

$$z = Ay + B, \quad m = Cy + D, \quad n = Ey + F,$$

где A, B, C, D, E и F — определенные числовые величины, значения которых определяются из системы уравнений (2.24) по значениям всех числовых величин a, b и c .

Подставляя значения z, m и n в уравнение (2.22), получим

$$\alpha = x^{\beta y} \gamma^{Ay+B} \delta^{Cy+D} \theta^{Ey+F}$$

или

$$\alpha = x^{\beta y} \gamma^{Ay} \gamma^B \delta^{Cy} \delta^D \theta^{Ey} \theta^F.$$

Разделив обе части последнего уравнения на $\gamma^B \delta^D \theta^E$, получим

$$\alpha / (\gamma^B \delta^D \theta^E) = x (\beta \gamma^A \delta^C \theta^E)^y. \quad (2.25)$$

В этом уравнении в соответствии с π -теоремой связь между пятью исходными величинами $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ и θ может быть представлена в виде обобщенной зависимости между двумя безразмерными комплексами этих величин

$$K_1 = \alpha / (\gamma^B \delta^D \theta^E); \quad K_2 = \beta \gamma^A \delta^C \theta^E.$$

Тогда в критериальной форме выражение (2.25) можно представить как

$$K_1 = x K_2^y. \quad (2.26)$$

Для нахождения конкретного вида уравнения (2.26) требуется определить числовые значения неизвестных величин — коэффициента x и показателя степени y . Это может быть сделано путем экспериментального исследования на опытной установке (модели) и обработки результатов экспериментов в виде зависимости между безразмерными комплексами K_1 и K_2 . В итоге получают расчетную зависимость между безразмерными комплексами, пригодную для целой группы подобных процессов, но в изученных пределах изменения величин K_1 и K_2 .

Для пользования методом анализа размерностей необходимо заранее знать, какие переменные должны входить в зависимость общего вида типа зависимости (2.20). Если при составлении такой исходной зависимости не учесть тех или иных параметров, которые влияют на процесс, то это может привести к серьезным ошибкам при получении конечного расчетного уравнения, что является недостатком метода анализа размерностей.

§ 2.4. Моделирование как метод научного исследования. Основные принципы моделирования

Путь от научно-исследовательской лаборатории до промышленного предприятия долг и сложен.

Разработка нового технологического процесса, проведенная в

лабораторных условиях, может дать лишь принципиальную схему будущего производства. Полученные опытным путем данные проверяются на так называемых пилотных (модельных) установках с целью определения удельных расходных коэффициентов, расчетных констант и выходов продуктов, а также подбора аппаратов, машин, конструкционных материалов. Однако такая схема еще более усложняется при увеличении масштабов производства и необходимости создания высокопроизводительных агрегатов больших единичных мощностей.

Заманчивым представляется отказаться от многоступенчатой проверки результатов лабораторного эксперимента и сразу выдавать необходимые для проектирования промышленного аппарата данные. Для этого необходимо: 1) знать основные кинематические закономерности процесса и их математическое описание; 2) наличие надежной теории масштабирования.

Глубокое исследование механизма основных процессов технологии с целью их математического описания представляет собой трудную задачу, так как, кроме исчерпывающей информации о влиянии большого числа различных факторов, необходимо иметь точные методы их теоретического обобщения. Итак, только единство экспериментального и теоретического методов исследования позволит добиться наилучшего эффекта при создании и эксплуатации современного предприятия строительной индустрии.

Теория моделирования развивается сейчас в двух направлениях: 1) по пути изучения современных сложных технологических процессов с помощью моделей с анализом влияния отдельных физических параметров и линейных размеров (физическое моделирование) и 2) по пути исследования математической модели процесса с помощью электронно-вычислительных машин (математическое моделирование). Оба направления ведут к одной общей цели — созданию точного метода теоретического и экспериментального исследования сложных, высокоскоростных технологических процессов, проводимых при экстремальных значениях температуры и давления, при большом числе взаимодействующих фаз. Точное моделирование должно также учитывать большое число внутренних связей отдельных параметров, влияющих на кинетику процесса, и осложняющее влияние протекающих химических реакций или вероятностные характеристики.

Особое значение имеют вопросы моделирования, связанные с масштабным переходом от модельных аппаратов к аппаратам большой единичной мощности. Эффективность моделирования позволит увеличить степень надежности при проектировании новых или усовершенствовании действующих предприятий. Моделирование как научный метод лежит в основе кибернетики — науки об управлении сложными процессами с целью повышения производительности труда.

Под *моделированием* понимают метод исследования, при котором вместо непосредственно интересующего нас процесса (или яв-

ления), протекающего в каком-нибудь объекте (оригинале), изучается соответствующий процесс на другом объекте (модели).

Результат моделирования заключается в предсказании поведения оригинала в рабочих условиях производства на основании расчета необходимых параметров оригинала по измеренным параметрам модели.

Методы моделирования основаны на подобии различных объектов. Современный этап технического прогресса характеризуется возрастающими сложностью внедряемых в производство процессов и темпами их внедрения. Вследствие этого значительно усложняются задачи научных разработок, а их результаты и технические новшества быстро устаревают. В этих условиях решающее значение приобретает фактор времени. Моделирование в ряде случаев резко сокращает сроки освоения новых процессов и позволяет достичь цели более простыми средствами.

К моделированию предъявляются следующие основные требования: а) опыты на модели должны проводиться быстрее и быть более простыми, удобными, экономичными и безопасными, чем опыты на оригинале; б) должны быть известны *алгоритмы*, по которым производится расчет параметров оригинала на основе испытания модели; в) структура, устройство и назначение модели должны соответствовать основным целям моделирования, так как ни одна модель принципиально не способна полностью отразить оригинал и любое моделирование носит приближенный характер.

Классифицировать модели можно различными способами, которые определяются постановкой задачи. Применительно к технологии строительных материалов проф. В. А. Вознесенский предлагает классифицировать модели по признакам, представленным на рис. 2.5.

К моделям *детерминированных систем* относятся такие, в которых все элементы взаимодействуют точно предвиденным способом,

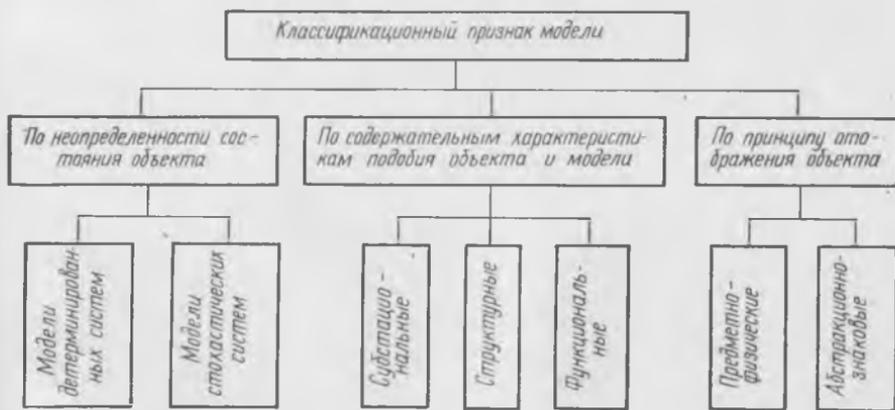


Рис. 2.5. Классификация моделей

а случайные факторы (Z) практически не влияют на течение процесса.

В отличие от них модели *стохастических систем* подчиняются вероятностным законам, на поведение отдельных элементов которых существенно влияют случайные входы. Например, передача теплоты через ограждение определяется уравнением $Q = k\Delta t^{\circ}Ft$, где k — суммарный коэффициент теплопередачи, зависящий от теплопроводности стенки, ее толщины и коэффициентов теплоотдачи. Последние во многом зависят от скорости движения среды относительно стенки (применительно к наружным ограждениям зданий — от скорости ветра, которая устанавливается на основе вероятностных методов обработки многолетних метеорологических данных).

Субстанциональные модели строят таким образом, чтобы их материал по своим свойствам был подобен материалу объекта. Например, для определения реальной прочности бетона в панели из нее выпиливают образец, который затем испытывают на прочность.

Структурные модели имитируют структуру или способ взаимодействия элементов объекта между собой. В нашей промышленности такие модели обычно строят для выявления оптимальных транспортных связей между, например, ДСК и стройками, ДСК и поставщиками сырья.

Функциональные модели имитируют одну или несколько основных (определяющих) функций объекта. Например, известно, что жесткость бетонной смеси $J = f(c, V/C_{\text{ист}})$, где c — концентрация цементного теста в бетоне. Выявив опытным путем вид функции f , получают функциональную модель жесткости бетонной смеси.

К предметно-физическим относятся модели, сохраняющие в основном природу явления. Примером может служить определение прочности бетона в панели выпиливанием из нее образцов.

Математические модели, широко применяемые в настоящее время, являются частным случаем абстрактно-знаковых моделей. Они отражают взаимосвязь элементов в системе в виде специальных символов.

В промышленности под моделированием чаще всего понимают экспериментальный метод, связанный с проведением опытов на физических материальных моделях и распространением результатов на оригинал. Нередко при проведении заводских опытов моделью служит сам промышленный аппарат, что облегчает задачу масштабного перехода от модели к оригиналу. Однако в этом случае возможности варьирования параметров процесса ограничены и моделирование из «активного» становится «пассивным», основываясь лишь на наблюдаемых в промышленном процессе факторах. При этом иногда выпадают из поля зрения некоторые факторы, действие которых может не проявляться в условиях наблюдаемого процесса. Поэтому во многих случаях физического моделирования целесообразно один оригинал моделировать с помощью различных упрощенных моделей, отражающих только отдельные черты оригинала

(«ступенчатое» моделирование). Такие модели одного и того же объекта или его частей могут быть непохожи друг на друга.

Однако опыты с моделями, в том числе и математическими, не заменяют других методов исследования, особенно опытов с настоящими машинами и аппаратами. Опыты на моделях и в натуре служат для взаимного развития и совершенствования. Они дополняют друг друга. Ступенчатое моделирование требует большой затраты средств и времени; в современных условиях оно не всегда допустимо и заменяется математическим моделированием на ЭВМ. Как видно, сущность моделирования заключается в воспроизведении изучаемого процесса в удобном и обоснованном масштабе.

§ 2.5. Общие принципы анализа и расчета процессов. Изоморфность уравнений переноса

В любом технологическом процессе участвует некоторая совокупность материальных тел. Технолога прежде всего интересуют те тела, которые являются объектами переработки. Изменение свойств объектов переработки происходит в результате их взаимодействия с другими телами.

Материальные тела, изменение свойств которых является целью рассматриваемого процесса, принято выделять из всей совокупности взаимодействующих тел и рассматривать как систему, по отношению к которой все другие тела являются окружающей средой.

Изменение свойств системы происходит в результате процессов переноса массы и энергии между отдельными ее частями и окружающей средой. Перенос вещества и энергии происходит молекулярно и конвективно. Перенос за счет движения микрочастиц (электронов, ионов, молекул) называют *молекулярным переносом*. В твердых телах молекулярный перенос проявляется в виде колебательного движения частиц или перемещения свободных электронов; в газах и жидкостях — в виде беспорядочного теплового движения микрочастиц. При выведении системы из положения равновесия появляется направленный поток вещества и энергии. Перенос вещества и энергии движущейся средой называют *конвективным переносом*. Молекулярный перенос определяется микроструктурой среды, т. е. ее свойствами. Конвективный — движением среды как целого и зависит от свойств этого движения: распределением скоростей в пространстве и во времени.

При практических расчетах процессов и аппаратов обычно решаются следующие основные задачи: 1) определение условий равновесного состояния системы; 2) вычисление расходов исходных материалов и количества получаемого готового продукта или полуфабриката (составление материального баланса); 3) определение необходимых расходов энергии для осуществления процесса (составление энергетического баланса); 4) установление оптимальных режимов работы аппаратов и установление их основных размеров.

Очередность постановки этих задач и определяет содержание и последовательность инженерных расчетов.

Начальным этапом является *расчет и анализ статики* процесса, т. е. определение *условий равновесия системы*. Системы, находящиеся в состоянии равновесия, не меняют своего состояния во времени. Для выведения такой системы из равновесия необходимо приложить к ней внешнюю силу. Определение направления протекающего процесса в равновесных системах под действием внешней силы опирается на два основных положения термодинамики — принцип Ле-Шателье и правило фаз Гиббса.

Согласно первому принципу, направление сил, возникающих в системе, выведенной из состояния равновесия, противоположно направлению возникающей силы. Рассматривая конкретные процессы на основе принципа Ле-Шателье, можно установить, какие параметры нужно изменять для изменения состояния системы в нужном для производства направлении.

Правило фаз Гиббса выражает зависимость между количествами компонентов системы k , фаз f и ее степеней свободы S :

$$S = k - f + 2. \quad (2.27)$$

Правило фаз позволяет установить количество переменных, определяющих равновесие системы, которые могут быть выбраны произвольно.

Материальный баланс основан на использовании закона сохранения массы. В общем виде для любой установки можно записать

$$G_{\text{вх}} + G_{\text{у}} = G_{\text{вых}} + G_{\text{о}}, \quad (2.28)$$

где $G_{\text{вх}}$, $G_{\text{у}}$, $G_{\text{вых}}$, $G_{\text{о}}$ — соответственно количество материала, поступившего в установку, имевшегося в установке, покинувшего установку, оставшегося в установке.

Материальный баланс может быть *общим* (суммарным), если он относится ко всей установке и в него включены все вещества, участвующие в процессе, или *частным*, если он составлен только по отношению к одному компоненту или к части установки. Частные материальные балансы, охватывающие часть установки, могут быть отнесены как ко всем компонентам системы, так и к одному из них. Во всех случаях сумма частных материальных балансов равна общему материальному балансу.

Когда в системе протекают химические реакции, при составлении частных материальных балансов следует иметь в виду возможные изменения количества соответствующего компонента. Потери материала в процессе производства могут быть вызваны не только химическими реакциями, но и испарениями влаги и другими чисто механическими потерями (например, потери с теплоносителем). Тогда уравнение материального баланса имеет вид

$$G_{\text{вх}} + G_{\text{у}} = G_{\text{вых}} + G_{\text{о}} + G_{\text{п}}. \quad (2.29)$$

Энергетический баланс составляют на основе закона сохранения энергии, согласно которому количество энергии, введенной в про-

цесс, равно количеству выделившейся энергии. Рассмотрим это положение на примере составления теплового баланса. Пусть Q_1 — количество теплоты, введенной в процесс с материалом; Q_2 — количество теплоты, подведенной извне (например, теплоносителем при пропарке бетона); Q_3 — количество теплоты, выделяющейся при проведении процесса за счет химической реакции (экзотермии цемента); Q_4 — количество теплоты, выводимой из процесса с готовой продукцией; Q_5 — количество теплоты, выделяемой в окружающую среду. Тогда по закону сохранения энергии

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_4 + Q_5 \quad (2.30)$$

Обычно при рассмотрении процессов тепловой обработки (а в общем случае любых процессов, происходящих с затратой энергии) определяемой величиной является расход теплоты (энергии), подводимой извне:

$$Q_2 = Q_4 + Q_5 - Q_1 - Q_3 \quad (2.31)$$

Энергетические балансы дают возможность оценить коэффициент полезного действия установок η , который представляет собой отношение полезно затраченной энергии (теплоты) $E_{\text{пол}}$, ($Q_{\text{пол}}$) ко всей затраченной энергии $E(Q)$ на проведение процесса. Коэффициент полезного действия $\eta = E_{\text{пол}}/E$ всегда меньше единицы.

Для анализа и расчета процессов кроме данных материального и энергетического балансов следует знать интенсивность протекания процессов. Для интенсификации любого производства необходимо, чтобы технологические процессы проходили с возможно большей скоростью. При рассмотрении гидродинамических, тепло- и массообменных процессов было замечено, что их кинетические уравнения аналогичны («тройная аналогия»).

Для тепловых процессов кинетическое уравнение

$$(dQ/dt)/A' = k\Delta t^\circ = \Delta t^\circ/R, \quad (2.32)$$

где Q — количество теплоты; A' — поверхность теплообмена; t — время; k — коэффициент теплопередачи; Δt° — разность температур в начальной и конечной точках переноса теплоты; R — термическое сопротивление, $R = 1/k$.

Для массообменных процессов кинетическое уравнение

$$(dm/dt)/A'' = k'\Delta c = \Delta c/R', \quad (2.33)$$

где m — масса вещества; A'' — площадь поверхности массообмена; t — время; k' — коэффициент проводимости массы; Δc — разность концентраций в определяемых точках; R' — сопротивление массопередачи, $R' = 1/k'$.

Для гидродинамических процессов, например для расхода жидкости, кинетическое уравнение

$$(dV/dt)/S = k_r\Delta p = \Delta p/R_r, \quad (2.34)$$

где V — объем протекающей жидкости; S — площадь сечения потока; t — время; k_r — коэффициент проводимости среды (аналогич-

но k и k'); Δp — разность давлений в начале и конце потока; R_r — гидравлическое сопротивление трубопровода, $R_r = 1/k_r$.

Таким образом, все рассмотренные кинетические уравнения могут быть приведены к единому виду

$$M/(At) = k\Delta, \quad (2.35)$$

где M — результат процесса, например количество перенесенного вещества или теплоты; A — некоторая величина, к которой отнесен результат процесса (в рассмотренных примерах площадь поверхности массообмена, площадь сечения потока, площадь теплообмена); t — время протекания процесса; k — коэффициент скорости процесса (коэффициент теплопередачи, массопередачи и т. д.); Δ — движущая сила процесса (разность давлений, температур, концентраций и т. д.).

Величина $M/(At)$ носит название *интенсивности процесса*. Она всегда пропорциональна движущей силе процесса Δ и обратно пропорциональна сопротивлению R . Из уравнения (2.35) следует, что для увеличения интенсивности процесса необходимо увеличить движущую силу или уменьшить сопротивление.

Глава 3. МЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ

§ 3.1. Процессы измельчения в промышленности строительных материалов. Классификация измельчителей

К механическим относятся такие процессы, основой которых является механическое воздействие на исходные материалы, описываемое законами механики твердых тел. В технологии строительных материалов к ним относятся измельчение, сортировка, смешение и транспортировка твердых компонентов. Эти процессы широко применяются в практике многих отраслей промышленности и, в частности, в промышленности строительных материалов.

Как правило, сырье для производства строительных материалов подвергают предварительной обработке. Сырье для большинства видов материалов только измельчают — щебень, песок, некоторые связующие глины. Иногда после измельчения глины обжигают и затем вновь измельчают. Обычно грубое измельчение называют дроблением, а тонкое и сверхтонкое — помолом.

В зависимости от крупности конечного продукта в промышленности строительных материалов различают:

Дробление	Размер кусков, мм	Помол	Размер зерен, мм
Крупное . . .	100 ... 350	Грубый . . .	5 ... 0,1
Среднее . . .	40 ... 100	Тонкий . . .	0,1 ... 0,05
Мелкое	5 ... 40	Сверхтонкий	менее 0,05

Измельчение природного и искусственного сырья и разделение его по крупности на фракции является одним из основных процессов технологии строительных материалов. Он имеет важнейшее значение для обеспечения высокого качества изделий в связи с решающим влиянием зернового состава масс на их способность к уплотнению (или, наоборот, к разуплотнению, например, в технологии получения пористых материалов) при формовании, протеканию физико-химических процессов твердения и спекания. Кроме того, измельчение оказывает влияние на некоторые важные свойства готового продукта, например термоустойчивость керамики.

Теория измельчения включает круг вопросов и проблем, связанных с исследованием путей и возможностей совершенствования существующих и создания новых методов измельчения и соответствующих измельчителей. Целью этих исследований является снижение стоимости измельчения, уменьшение удельных затрат энергии, износа и металлоемкости измельчителей, увеличение их долговечности и удобства эксплуатации. Учитывая, что стоимость основной массы сырья для производства строительных материалов сравнительно высока, технико-экономический фактор играет особую роль в теории измельчителей.

Главной из перечисленных задач является необходимость получения измельченного сырья, удовлетворяющего требованиям, предъявляемым технологом. Основные из них: а) получение продукта заданного зернового состава; б) требуемая удельная поверхность; в) оптимальная конфигурация зерен; г) необходимая прочность.

Классификация машин и механизмов, в том числе и измельчителей, должна точно определять область их применения. Чем больше факторов учитывается классификацией, тем выше точность в определении места машины в ряде других машин и тем совершеннее принятая классификация. В настоящее время единой классификации измельчителей нет. Существует целый ряд классификаций, учитывающих какой-либо один признак. Например, наиболее распространенной является классификация измельчителей, в основу которой положена дисперсность измельчаемого материала: дробилки — для крупного, среднего и мелкого дробления, мельницы — для грубого, тонкого и сверхтонкого помола. Такая классификация не может считаться удовлетворительной прежде всего потому, что не позволяет технологу провести сравнительную оценку измельчителей по перечисленным выше основным требованиям, предъявляемым к измельченному продукту. Так, при наличии большого количества измельчителей и необходимости выбора одного из них для данного конкретного случая (допустим, для тонкого измельчения цемента), технолог руководствуется не классификацией, приведенной выше, а производит его по имеющимся эксплуатационным данным, полагаясь также на свою субъективную инженерную интуицию. А как быть, если часть требуемых данных отсутствует или же стоит вопрос о применении новой, по некоторым

данным, прогрессивной конструкции? В этом случае неопределенность принятого решения усугубляется еще больше.

Не существует единства и в оценке такого важного показателя, как твердость и прочность измельчаемого материала. В одних случаях твердость оценивается по шкале Мооса, в других — по значениям предельного напряжения при одноосном сжатии. Например, у одних авторов к мягким породам относятся материалы с $R_{сж} = 10$ МПа, средним породам — 10...50 МПа и твердым породам — более 50 МПа. У других понятие слабых, средних и крепких пород означает прочность соответственно 20...120; 120...240 и 240...400 МПа. Такие широкие колебания говорят о том, что классификация по дисперсности не учитывает прочностных характеристик измельчаемого материала.

Аналогичные классификации по тому или иному внешнему признаку, органически не связанному с энергетикой, конструкцией, областью применения и качеством выводимого продукта, являются произвольными и могут быть построены в различных вариантах. Например, принятое разделение дробилок на щековые, конусные, валковые, молотковые и роторные говорит лишь о их конструкции и никак не может помочь технологу в обосновании выбора типа дробилки. Создание единой классификации вопрос сложный, требующий совместного решения как механиками, так и технологами, но крайне необходимый.

Измельчение материалов производится несколькими методами — раздавливанием, раскалыванием, ударом, изломом и истиранием

(рис. 3.1). *Раздавливание* материала наступает после перехода напряжений за предел прочности на сжатие. *Раскалывание* кусков происходит в результате их расклинивания и последующего разрыва вследствие возникновения в них напряжений от растяжения. *Ударное дробление* — результат действия динамических нагрузок с возникновением в материале сжимающих, растягивающих, изгибающих и сдвиговых напряжений. *Излом* куска происходит в результате его изгиба. При *истирании* внешние слои куска подвергаются деформации сдвига и постепенно срезаются скользящими

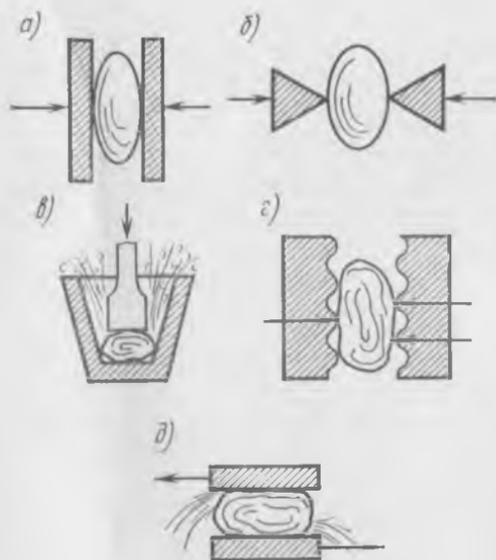


Рис. 3.1. Методы измельчения:

а — раздавливание; б — раскалывание; в — удар; г — излом; д — истирание

рабочими поверхностями измельчителя вследствие перехода касательных напряжений за пределы прочности.

В зависимости от физико-механических свойств материалов выбирают следующие методы измельчения:

Материал	Метод
Прочный и хрупкий	Раздавливание, удар, излом
Прочный и вязкий	Раздавливание, истирание
Хрупкий, средней прочности	Удар, раскалывание, истирание
Вязкий, средней прочности	Истирание, удар, раскалывание

Принципиальные схемы измельчителей показаны на рис. 3.2. В *щечковых дробилках* материал измельчается раздавливанием, раскалыванием и частичным истиранием в пространстве между щеками при их периодическом сближении. *Конусные дробилки* основаны на принципе излома, раздавливания и частичного истирания между двумя конусами, вращающимися эксцентрично по отношению друг к другу. В *валковых дробилках* материал раздавливается между валками, вращающимися навстречу друг другу. При разных скоростях валков имеет место и истирание материала. Измельчение материала в *шнековых дробилках* происходит за счет среза и частичного истирания куса рабочим органом агрегата. В *молотковых дробилках* материал измельчается ударом молотков, а также истиранием.

Шаровые мельницы применяются в основном для тонкого и сверхтонкого помола материала. Измельчение кусков происходит во вращающемся или вибрирующем барабане с помощью загруженных в него мелющих тел ударом и истиранием частиц материала мелющими телами и друг с другом. В промышленности строительных материалов *бегуны* применяют для мелкого дробления или грубого помола глины, шамота, кварца, когда наряду с измельчением материала необходимо обеспечить уплотнение, истирание, совместный помол и смешение материалов. Измельчение происходит за счет раздавливания и истирания частиц материала массивными катками, перемещающимися по днцу чаши, на котором находится материал. *Дезинтеграторы* и *аэробильные мельницы* относятся к аппаратам ударного действия, в которых материал измельчается ударами вращающихся рабочих органов по частицам материала, повторным соударением частиц с отражательными элементами, а также между собой. Особенностью аэробильных мельниц является то, что разгрузка материала происходит восходящим потоком воздуха, подаваемого в рабочую камеру агрегата. *Струйные мельницы* предназначены для сверхтонкого измельчения материала. Помол происходит в результате трения и соударения частиц материала одна о другую, а также о стенки камеры при движении материала в воздушном потоке большой скорости.

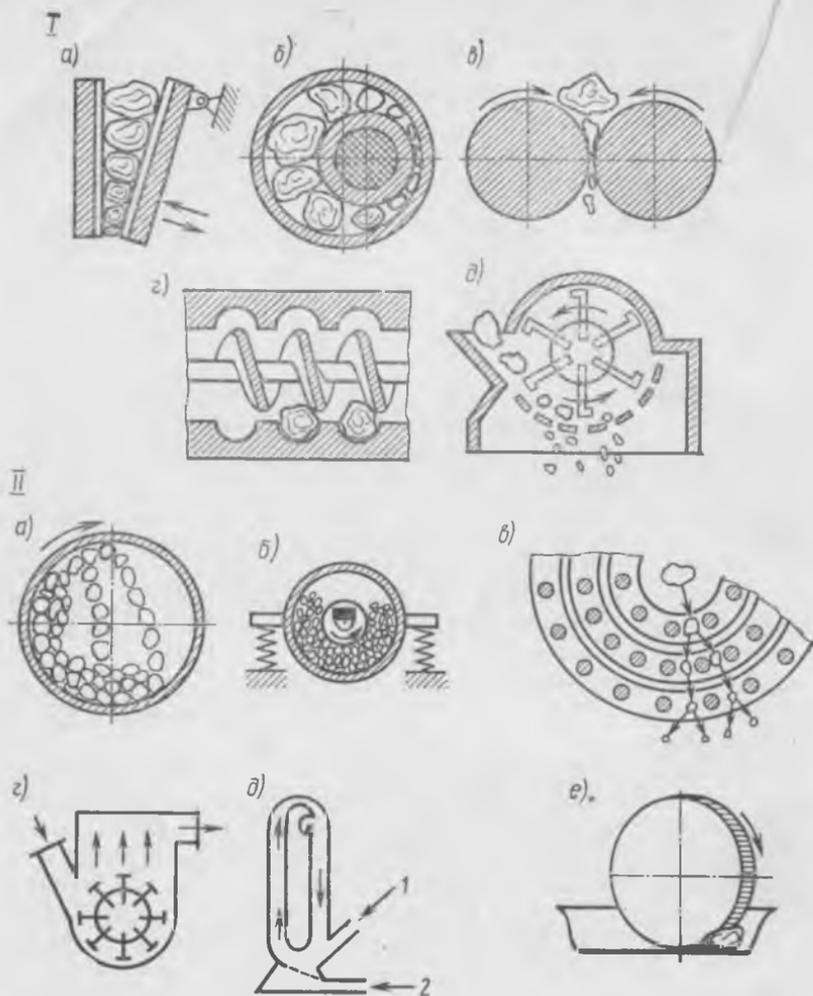


Рис. 3.2. Принципиальные схемы измельчителей:

I — дробилки; *a* — щелковая; *б* — конусная; *в* — валковая; *г* — шнековая; *д* — молотковая;
II — мельницы; *a* — шаровая; *б* — шаровая вибрационная; *в* — дезинтегратор; *г* — аэробильная;
д — струйная; *е* — бегуны; *1* — материал; *2* — воздух

§ 3.2. Основные законы измельчения

Процессы измельчения отличаются сложностью и находятся в зависимости от таких факторов, как форма, размеры и зерновой состав исходного и полученного материала, его физико-механических свойств — однородности, наличия дефектов (трещиноватости), прочности, твердости, влажности, вязкости и др., конструктивных особенностей измельчителя, определяющих кинематику измельчаемой частицы. Сложность явлений, наблюдающихся при измельче-

нии, практически исключает возможность создания единого универсального закона измельчения.

Существует несколько уравнений, в той или иной степени объясняющих затраты энергии на измельчение.

П. Риттенгер в 1867 г. выдвинул гипотезу, согласно которой работа, затраченная на измельчение, прямо пропорциональна вновь полученной обнаженной поверхности измельчаемого материала:

$$W = k_R A, \quad (3.1)$$

где W — затраченная работа; k_R — коэффициент пропорциональности; A — вновь образованная поверхность.

Если обозначить размер исходных зерен d_1 , а измельченных d_2 , то увеличение поверхности единицы объема материала составит $A = 1/d_2 - 1/d_1$ и уравнение (3.1) примет вид $W = k_R (1/d_2 - 1/d_1)$.

Обозначая степень измельчения $i = d_1/d_2$, получим $W = k_R (i - 1)/d_1$.

Для двух последовательных стадий измельчения от d_1 до d_2 и от d_2 до d_3 при соответственно степенях измельчения i_1 и i_2

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{k_R [(i_1 - 1)/d_1]}{k_R [(i_2 - 1)/d_2]} = \frac{1}{i_1} \frac{i_1 - 1}{i_2 - 1}.$$

Следовательно, отношение работ измельчения на двух последовательных стадиях определяется только степенями измельчения. При $i_1 = i_2 = i$ $W_1/W_2 = 1/i$.

При значительных степенях измельчения (например, при тонком помолу цемента) i_1 и $i_2 \gg 1$, тогда $W_1/W_2 \approx i_1 d_2 / (i_2 d_1) = 1/i_2$.

В 1874 г. В. А. Кирпичевым, а затем в 1885 г. Ф. Киком была сформулирована вторая гипотеза, согласно которой работа, затрачиваемая на измельчение, пропорциональна объемам измельчаемого и измельченного материала.

Из теории упругости известно, что работа внутренних сил упругости равна (при отсутствии потерь) работе внешних сил, вызвавших рассматриваемую упругую деформацию тела, т. е. $W = \sigma^2 V / (2E)$, где σ — напряжение, возникающее при деформации; V — объем деформированного тела; E — модуль упругости (модуль Юнга).

Обозначив $\sigma^2 / (2E) = k_K$, получим

$$W = k_K V. \quad (3.2)$$

Ф. Бонд в 1952 г. предложил уравнение, по которому работа, необходимая для измельчения материала от d_1 до d_2 , равна разности количества суммарной энергии, необходимой для доведения материала от теоретически бесконечного размера до d_1 и до d_2 . Иными словами, работа при дроблении пропорциональна среднегеометрическому между объемом и вновь обнаженной поверхностью

$$W = k_B \sqrt{VA}. \quad (3.3)$$

Теория Бонда предполагает, что передаваемая телу при сжатии энергия сначала распределяется по его объему и, следовательно, пропорциональна d^3 , но с момента образования трещины энергия концентрируется на поверхности по ее краям и тогда она пропорциональна d^2 .

Выражая (3.1), (3.2) и (3.3) через диаметр дробимого куска, можно получить $W = k_R D^2$ — по Риттенгеру; $W = k_B D^{2,5}$ — по Бонду; $W = k_K D^3$ — по Кирпичеву — Кики.

По Ребиндеру, работа разрушения твердого тела складывается из работы упругих и пластических деформаций в объеме тела ΔV , пропорциональна этому объему и равна $k\Delta V$ и работы образования свободной поверхностной энергии вновь образовавшейся поверхности $\sigma\Delta A$. Таким образом, суммарная работа разрушения

$$W = \sigma\Delta A + k\Delta V. \quad (3.4)$$

Анализируя уравнение Ребиндера, можно получить формулы Риттенгера и Кирпичева — Кика. В самом деле, при помоле, когда наблюдается высокая степень измельчения, работой деформирования объема вследствие ее относительной малости можно пренебречь и уравнение (3.4) преобразуется в уравнение (3.1). При крупном дроблении с малой степенью измельчения можно пренебречь работой, затрачиваемой на образование новой поверхности вследствие ее незначительной величины и уравнение (3.4) переходит в уравнение (3.2).

Поскольку в настоящее время нет достаточно надежных обоснований по выбору коэффициентов, входящих в уравнение, формула Ребиндера не получила широкого распространения.

В 1956 г. Рунквист предложил обобщающую гипотезу, по которой работа на измельчение одного куска с определенной степенью измельчения равна $W = k_{Ru} D^{4-m}$, где $m = 1 \dots 2$, а k_{Ru} — в пределах $k_{R \dots} k_{B \dots} k_K$.

Методы решения задачи о расходе энергии на измельчение, предложенные Риттенгером и Кирпичевым — Киком, основаны на определенном физическом толковании процесса. Методы Бонда и Рунквиста такого толкования не дают. Нельзя представить себе физической картины, которая характеризовалась бы квадратным корнем произведения поверхности на объем тела. Непонятна и физическая модель, когда работа измельчения пропорциональна линейному размеру в какой-либо дробной степени.

Чтобы применить ту или иную закономерность, необходимо знать физическую сущность процессов, происходящих при разрушении. При любом виде деформаций процесс разрушения можно представить в следующем виде. Внешние силы вызывают накопление внутренней энергии упругих деформаций. Напряжения в куске возрастают, пока в каком-либо месте вследствие концентрации напряжений, вызванных местными дефектами, они не превысят предела прочности. Начинается развитие трещины, сопровождающееся перераспределением энергии упругих деформаций, часть которых превращается в энергию вновь образованных поверхностей. Она и

является полезной энергией дробления. Остальная энергия уходит главным образом на упругие деформации сжатия и рассеивается в виде теплоты и других видов энергии.

Перечисленные гипотезы не в состоянии оценить многообразие явлений, происходящих при дроблении, хотя дают в некоторых случаях удовлетворительные результаты. Так, для среднего дробления работу можно рассчитать с достаточной точностью по формуле Бонда. Однако, рассматривая приведенные формулы, можно сделать важные качественные выводы, хорошо согласующиеся с практикой. Например, основываясь на уравнении Кика, можно провести следующие рассуждения.

Пусть после n -кратного разрушения тела получается a_0^n частиц размером d из куска диаметром D . Для получения таких частиц объемная степень измельчения $D^3/d^3 = i^3 = a_0^n$, откуда $3 \lg i = n \lg a_0$ или $n = 3 \lg i / \lg a_0$.

Так как при каждом приеме разрушения теоретически затрачивается одна и та же работа, а для разрушения тела размером D до частиц размером d требуется n приемов, то общая работа разрушения

$$W = \frac{\sigma^2 D^3}{2E} \frac{3 \lg i}{\lg a_n}. \quad (3.5)$$

Формула (3.5) показывает, что расход энергии с увеличением степени однократного измельчения (i) растет.

Подтвердим это примером. Так как тело при разрушении делится минимум на две части ($a=2$), то, очевидно, максимальная работа

$$W_{\max} = \frac{\sigma^2 D^3}{2E} \frac{3 \lg i}{\lg 2} \simeq 5 \frac{\sigma^2 D^3}{E} \lg i.$$

Пусть при дроблении $i=4$, тогда $W_{i=4} = 3\sigma^2 D^3/E$, а при помолу при $i=100$ $W_{i=100} = 10 \sigma^2 D^3/E$.

Следовательно, теоретически при помолу расход энергии в 3...4 раза больше, чем при среднем дроблении. По практическим данным расход на помол действительно выше, чем на дробление, но не в 3...4 раза, а в 15...20 раз. Это расхождение объясняется, во-первых, «упрочнением» частиц по мере уменьшения их размера (см. § 3.3) и, во-вторых, тормозящим действием переизмельченного материала. Формула (3.5) показывает, что современные машины для помола менее совершенны, чем дробилки. Она также указывает на технологический прием, позволяющий уменьшить мощность помольных установок. Из нее следует, что нецелесообразно в одной камере вести процесс с высокой степенью измельчения. Экономно вести его в нескольких, последовательно установленных камерах с обязательным промежуточным отбором фракций, не нуждающихся в дальнейшем измельчении.

Сопоставление различных гипотез, характеризующих связь между работой дробления и размерами исходных кусков, дает диаграм-

ма Хукки (рис. 3.3). Согласно диаграмме расход энергии на получение 1 т щебня фракции 5...40 (наиболее употребительной при производстве сборного железобетона) составляет примерно 0,4 кВт·ч; на получение 1 т молотого песка удельной поверхностью около 1800 см²/г (при производстве ячеистого бетона) — 2 кВт·ч; на получение 1 т цемента удельной поверхностью 2800 ... 3000 см²/г — 7 кВт·ч. Данные, полученные по кривой Хукки, достаточно хорошо корреспондируются с расчетами, приведенными выше. Практические же расходы энергии значительно выше и составляют для помола цемента 35 ... 45 кВт·ч/т, песка 10 ... 15 кВт·ч, дробления щебня 0,6 ...

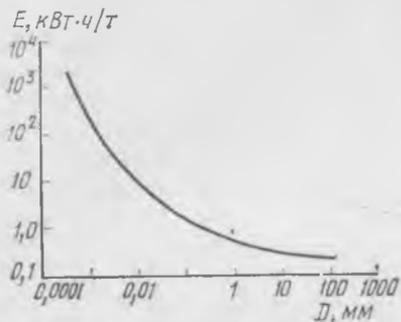


Рис. 3.3. Зависимость удельного расхода энергии E на измельчение от конечной крупности D материала (по Р. Т. Хукки)

1 кВт·ч/т. Все это говорит об относительности количественных расчетов, проведенных по гипотезам Риттенгера, Кирпичева — Кика и Бонда, однако правильно отражающих качественную характеристику процессов измельчения.

§ 3.3. Теоретическая и истинная прочность материала

Инженерная практика показала, что разрушение любых материалов зависит от различных локальных повреждений или дефектов, имеющих в образце или конструкции. Однако остался открытым вопрос, насколько существенно снижается прочность из-за наличия в материале тех или иных дефектов.

На свойства строительных материалов, в том числе и на прочность, решающее влияние оказывает их строение. Под *строением* подразумевается взаимное сочетание и распределение кристаллической, стекловидной (аморфной) и газовой (т. е. пор) фаз, их физико-химическая природа и количественное соотношение. Особенности строения любого строительного материала оценивают его микро- и макроструктурой. *Микроструктура* устанавливает природу кристаллических фаз, характер их строения и сочетания со стекловидной фазой и порами. *Макроструктура* определяет объем пор, их размеры, строение, форму, взаимное расположение в материале.

В большинстве случаев свойства неорганических материалов обуславливаются особенностью фазового состава и характером строения фаз. Под *фазовым составом* подразумевают природу и характер строения кристаллических фаз и их сочетание в количественном соотношении со стекловидной фазой.

Для материалов органического происхождения фактором, определяющим основные свойства, является наличие аморфной фазы и

характер ее связей с кристаллическими и стекловидными фазами (наполнителями). Для плотных материалов свойства определяются в основном микроструктурой, а для пористых — макроструктурой.

Прочность реальных материалов следует сравнивать с твердыми телами, имеющими идеальную структуру, прочность которых может быть найдена расчетом (теоретическая прочность).

Теоретическая прочность представляет собой то критическое напряжение, которое надо квазистатически (медленно) приложить к идеальному бездефектному материалу при достаточно низких температурах, чтобы получить необратимую диссоциацию материала. Прочность твердых тел в конечном счете обусловлена силами взаимодействия между атомами и ионами, составляющими тело.



Рис. 3.4. Основные типы структур

Твердые тела, как правило, имеют кристаллическое строение, в котором элементы — атомы, ионы, молекулы — расположены в узлах кристаллической решетки, образующей пространственную структуру правильной повторяющейся геометрической формы. Твердые тела не кристаллического строения (стекла, пластмассы и т. п.) имеют лишь ближний порядок. В зависимости от природы сил, удерживающих атомы, ионы и молекулы около центров равновесия, обычно рассматривают четыре типа кристаллических структур: атомные, молекулярные, ионные и металлические (рис. 3.4, а... д). В узлах ионных кристаллов размещаются противоположно заряженные ионы, каждый из которых находится в совершенно одинаковом отношении ко всем окружающим его ионам противоположного знака. Ионы взаимодействуют между собой по закону Кулона. Притяжению разноименно заряженных частиц препятствуют силы отталкивания между одноименно заряженными электронными оболочками. Последние проявляются на малых расстояниях и очень быстро увеличиваются с уменьшением этого расстояния.

На рис. 3.5 приведен график энергии связи для ионных кристаллов. Кривая 3 результирующей энергии связи имеет характерный вид с минимумом (потенциальная яма) при $r=r_0$. Именно этот минимум

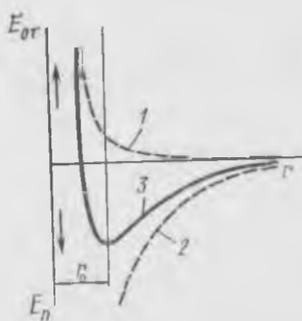


Рис. 3.5. Схема энергии связи притяжения и отталкивания:

1 — энергия отталкивания;
2 — энергия притяжения;
3 — результирующая энергия; r_0 — равновесное расстояние

и объясняет удержание элементов твердого тела около центров равновесия на расстоянии r_0 между ионами в молекуле. При $r=r_0$ сила притяжения равна силе отталкивания, а результирующая сила взаимодействия частиц равна нулю.

Энергию притяжения ($E_{\text{п}}$) можно подсчитать по закону Кулона

$$E_{\text{п}} = -e^2/(4\pi\epsilon_0 r), \quad (3.6)$$

где e — заряд иона; ϵ_0 — электрическая постоянная; r — расстояние между ионами.

Сила притяжения

$$F_{\text{п}} = -\partial E/\partial r = -e^2/(4\pi\epsilon_0 r^2).$$

Энергия отталкивания по Борну

$$E_{\text{от}} = B/r^n, \quad (3.7)$$

где B и n — постоянные;
сила отталкивания

$$F_{\text{от}} = \partial E_{\text{от}}/\partial r = nB/r^{n+1}.$$

Результирующая энергия взаимодействия ионов

$$E = E_{\text{п}} + E_{\text{от}} = B/r^n - e^2/(4\pi\epsilon_0 r). \quad (3.8)$$

Ионная связь характерна для кристаллических решеток солей типа NaCl, KCl, NaBr и др.

При атомной связи электроны принадлежат одновременно двум ядрам молекул типа H_2 , O_2 , N_2 . Если силы обобществленных электронов направлены в противоположные стороны (антипараллельны), то возникают силы притяжения и энергия связи по Лондону может быть подсчитана по уравнению

$$E_s = 2E_0 + (K + W)/(1 + S^2), \quad (3.9)$$

где $2E_0$ — суммарная энергия двух изолированных атомов; K — электростатическая (кулоновская) энергия связи; S — интеграл неортогональности, изменяющийся от 0 до 1.

Атомная (валентная, обменная) связь характерна для силикатных материалов и большинства горных пород. Характер графика энергии связи по уравнению (3.9) аналогичен представленному на рис. 3.5, однако при большей величине потенциальной ямы.

Металлическая структура характеризуется относительно малой связью внешних валентных электронов в атомах металлов с ядром. В жидком и твердом состоянии вещества атомы располагаются настолько близко друг от друга, что валентные электроны приобретают способность покидать свои атомы и свободно помещаться внутри решетки (обозначены точками на рис. 3.4). Связь в решетке металла возникает в результате взаимодействия положительных ионов с электронным газом. Электроны, находясь между ионами, стараются стянуть их, стремясь уравновесить силы отталкивания, действующими между положительно заряженными ионами.

С уменьшением расстояния между ионами увеличивается плотность электронного газа и, как следствие, возрастает сила притяжения. С другой стороны, с уменьшением расстояния между положительно заряженными ионами увеличиваются силы отталкивания, которые стремятся удалить ионы друг от друга. Решетка становится устойчивой на таком расстоянии между ионами, когда силы притяжения и отталкивания уравниваются.

Металлическая связь имеет сходство с валентной. В основе этих связей лежит обобществление внешних валентных электронов, но при валентной связи участвуют пары электронов от пары ближайших соседних атомов, а в металлической связи участвуют все атомы кристалла, в то время как свободные электроны перемещаются не у своих атомов, а внутри всей решетки.

Наиболее общим видом связи, возникающей между любыми атомами и молекулами, являются силы Ван-дер-Ваальса. Они возникают между электрически нейтральными системами и системами, не обладающими электрическим моментом.

Различают три вида ван-дер-ваальсового взаимодействия между молекулами: ориентационное — в случае дипольной молекулы; индукционное — при возникновении наведенных электрических моментов; дисперсионное — возникающее между нейтральными молекулами при синхронном движении электронов и антипараллельной направленности спинов.

Разновидностью ориентационного ван-дер-ваальсового взаимодействия является водородная связь, имеющая энергию связи больше, чем другие виды молекулярной связи.

Характер взаимодействия между молекулами при связях Ван-дер-Ваальса, в том числе и при водородных, соответствует рис. 3.5, хотя величина потенциальной ямы значительно меньше. Таким образом, характер кривых, представленных на этом графике, отражает характер взаимодействия между частицами твердого тела при всех видах связи.

В табл. 3.1 приведена сравнительная характеристика различных видов связи.

Таблица 3.1. Характеристика связей в кристаллической решетке твердых тел

Тип связи	Вещество	Энергия связи, кДж/моль	Теоретическая ориентировочная прочность, МПа	
Ионная	NaCl	754	38 000	
	Атомная	Алмаз	712	36 000
Металлическая	SiC	1387	60 000	
	Молекулярная	Na	109	5 500
	CH ₄	10	500	
	Лед (водородная)	5	2 500	

Для многих твердых тел со сложной структурой при известной прочности связи двух изолированных атомов переход от энергии парного взаимодействия к энергии атома в твердом теле затруднителен, поэтому проведение достаточно строгих расчетов теоретической прочности пока невозможно.

Орован предложил теоретическую прочность подсчитывать по формуле

$$\tau_T = (E \alpha_{\text{пов}} / r_0)^{1/2}, \quad (3.10)$$

где E — модуль упругости Юнга; $\alpha_{\text{пов}}$ — свободная поверхностная энергия твердого тела; r_0 — равновесное расстояние между атомами.

Рассчитанная по этой формуле теоретическая прочность некоторых материалов приведена в табл. 3.2.

Таблица 3.2. Теоретическая прочность некоторых материалов

Вещество	Модуль Юнга, МПа	Свободная поверхностная энергия, (Дж/см ²) · 10 ⁻³	Теоретическая прочность, МПа
Медь	196 000	1,65	40 000
Железо	265 000	2,0	77 500
Алмаз	1 230 000	5,4	209 000
Графит	10 200	0,07	1 430
Кремний	192 000	1,2	32 600
Силикатное стекло	74 000	0,56	16 300

Все приведенные выше рассуждения относились к идеальным материалам. Реальные же композиционные материалы имеют различного рода дефекты, связанные с дефектами кристаллической решетки и микротрещинами Гриффитса (см. ниже).

Дефекты в кристаллах подразделяются на точечные (нульмерные), одномерные и двумерные.

Различают *точечные дефекты* энергетические, электронные и атомные. Энергетические дефекты (фононы) — временные искажения регулярности решетки кристалла, вызванные тепловым движением или воздействием различных радиаций — светового, рентгеновского и других излучений. К электронным дефектам относятся избыточные электроны, недостаток электронов (незаполненные валентные связи в кристалле — дырки) и парные дефекты (экситоны), состоящие из электрона и дырки, связанные между собой кулоновскими силами. На рис. 3.6 показаны три вида атомных дефектов. Они проявляются в виде вакантных узлов (дефекты Шоттки) (рис. 3.6, а), в виде смещения атома из узла в междоузлие (дефекты Френкеля) (рис. 3.6, б), в виде внедрения в решетку чужеродного атома или иона (рис. 3.6, в).

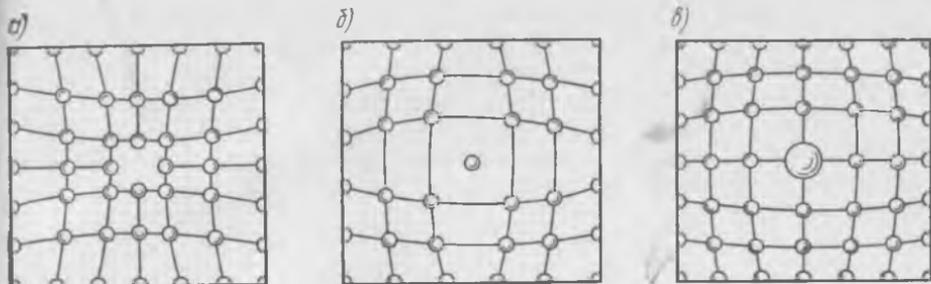


Рис. 3.6. Атомные дефекты кристаллической решетки

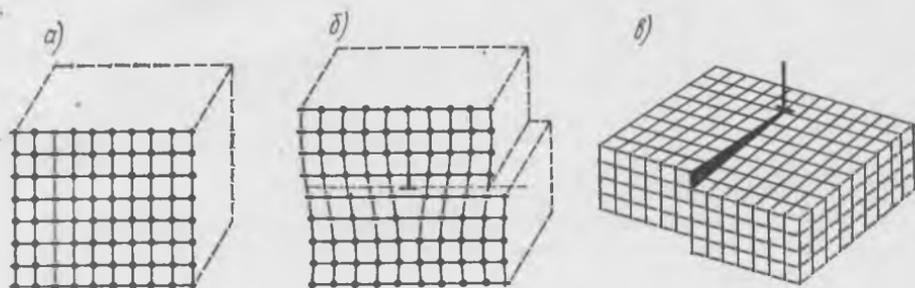


Рис. 3.7. Схемы дислокаций:

а — кристалл идеальной структуры; б — то же, с краевой дислокацией; в — то же, с винтовой дислокацией; \perp — ядро дислокации

К *одномерным* (линейным) *дефектам* относятся дислокации. Простейшими случаями дислокаций являются краевая и винтовая. На рис. 3.7, а изображено строение идеального кристалла в виде семейства параллельных друг другу атомных плоскостей. Если одна из них обрывается внутри кристалла, то место ее обрыва образует краевую дислокацию. Искажение решетки, максимальное вблизи дислокации, быстро рассасывается по мере удаления от нее (рис. 3.7, б). В случае винтовой дислокации нет отрыва внутри кристалла какой-нибудь из атомных плоскостей, но сами атомные плоскости представляют собой систему, подобную винтовой лестнице. По существу, это одна атомная плоскость, закрученная по винтовой линии. Винтовая дислокация может быть представлена в виде дезориентации блоков (рис. 3.7, в). Участок, примыкающий к оси дислокации, представлен в виде двух блоков, один из которых как бы соскользнул на один период по отношению к соседнему блоку. Как и в случае краевой дислокации, наибольшие искажения решетки находятся вблизи оси дислокации. Область наибольших искажений решетки называется ядром дислокации. Любая конкретная дислокация может быть представлена как сочетание краевой и винтовой дислокаций.

К двумерным (плоскостным) дефектам относятся границы между зернами кристаллов, ряды линейных дислокаций. Сама поверхность кристалла может рассматриваться как двумерный дефект.

Точечные дефекты типа вакансий имеются в каждом кристалле, они постоянно зарождаются и исчезают под действием тепловых флуктуаций. По формуле Больцмана равновесная концентрация вакансий n_v в кристалле при данной температуре T определяется как

$$n_v = n e^{-E_v/(RT)}, \quad (3.11)$$

где n — число атомов в единице объема кристалла; E_v — энергия образования вакансий; R — постоянная Больцмана.

Для большинства кристаллов $E_v = 1$ эВ. При комнатной температуре $RT \approx 0,025$ эВ, следовательно, $n_v/n \approx e^{-1/0,025} \approx 10^{-14}$.

При повышении температуры относительная концентрация вакансий быстро растет и при $T = 600$ К она достигает 10^{-5} , а при $T = 900$ К — 10^{-2} .

Подобные рассуждения можно провести и относительно концентрации внедрений с учетом того, что энергия образования дефектов Френкеля составляет 3...5 эВ.

Даже если относительная концентрация атомных дефектов и небольшая, то изменения физических свойств кристалла в связи с ними могут быть огромными.

Дислокации, являясь протяженными дефектами кристалла, охватывают гораздо больше узлов, чем атомные дефекты. Энергия дислокации оценивается величиной порядка $4 \cdot 10^{-19}$ Дж на 1 м длины дислокации. Такая большая энергия, необходимая для создания дислокаций, делает их практически атермичными, т. е. не зависящими от температуры. В отличие от вакансий возможность появления дислокаций от тепловых флуктуаций исчезающе мала для всего интервала температур кристаллического состояния вещества.

В реальном кристалле дислокации возникают в процессе его роста из раствора или расплава. Изучение структуры реальных кристаллов показывает, что их внутреннее строение отличается от строения идеальных кристаллов. Реальные кристаллы состоят из блоков правильного строения, расположенных лишь приблизительно параллельно друг другу. Принято говорить, что реальные кристаллы имеют мозаичную структуру. Размеры блоков колеблются от 10^{-4} до 10^{-6} см. На рис. 3.8 показаны два блока, растущих навстречу друг другу и развернутых по отношению друг к другу на угол ϕ . При срастании кристаллическая решетка в плоскости соприкосновения будет иметь различную ориентацию. Следовательно, возникнет переходный слой, в котором решетка с ориентацией одного блока переходит к ориентации другого блока.

Источником дислокаций в недеформированном кристалле могут быть также скопления вакансий (рис. 3.9).

Сдвигообразование в кристалле, развивающееся под действием внешней силы, представляет собой движение дислокаций по плос-

костям скольжения и выход их на поверхность кристалла. Если бы сдвигообразование происходило только за счет выхода дислокаций, уже имеющихся в кристалле, то пластическая деформация привела бы к истощению дислокаций и переводу кристалла в более

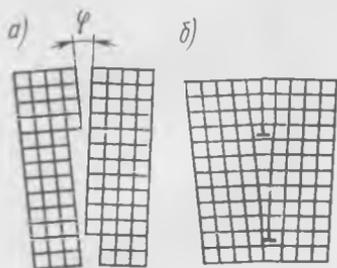


Рис. 3.8. Образование дислокаций на границах блоков:

a — блоки, растущие навстречу друг другу; φ — угол между ними; *b* — возникшие дислокации при срастании блоков

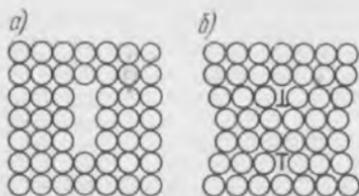


Рис. 3.9. Образование дислокаций из скопления вакансий:

a — скопление вакансий в кристалле; *b* — дислокации, возникшие из этого скопления

совершенное состояние. Опыт показывает, что с ростом деформации искажение решетки растет, следовательно, растет и плотность дислокации. Например, в хорошо отожженных металлах плотность дислокаций составляет $10^7 \dots 10^8 \text{ см}^{-2}$. После холодной обработки (прокатки, волочения) плотность дислокации увеличивается до $10^{11} \dots 10^{12} \text{ см}^{-2}$. В этих дислокациях концентрируется почти вся энергия, поглощенная металлом при пластическом деформировании.

В настоящее время принято считать, что под действием внешних сил в процессе сдвигообразования дислокации генерируются. С другой стороны, известно, что по мере развития пластической деформации и роста количества дефектов кристалл упрочняется. Сущность этого упрочнения состоит во взаимодействии дислокаций друг с другом и с другими дефектами решетки, приводящем к затруднению перемещения их в решетке кристалла. Дислокация, вызывая упругое искажение решетки, создает вокруг себя силовое поле, характеризующееся в каждой точке определенными касательными и нормальными напряжениями. При попадании в него другой дислокации возникают силы, стремящиеся или сблизить, или оттолкнуть дислокации друг от друга. Если дислокации расположены в одной плоскости, то одноименные дислокации отталкиваются, разноименные — притягиваются друг к другу. По мере накопления дислокаций в данной плоскости скольжения увеличивается сопротивление сдвигу и кристалл упрочняется.

Предположим, что дислокация при своем перемещении встречает какое-либо препятствие *D* (рис. 3.10) (чужеродный атом, пересечение другой дислокации и т. п.). При приближении к препятствию дислокация постепенно искривляется и образует петлю, огибающую его. За препятствием петля замыкается и дислокация снова становится прямолинейной. Огибание дислокацией препят-

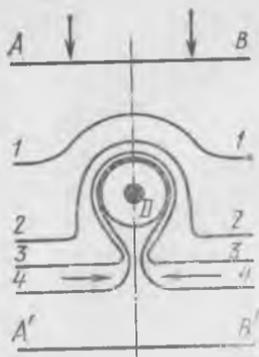


Рис. 3.10. Схема прохождения линейной дислокации через препятствие:

АВ — начальная форма линейной дислокации; 1, 2, 3, 4 — постепенное искривление дислокации по мере прохождения препятствия D; А'В' — выпрямление дислокации после прохождения препятствия

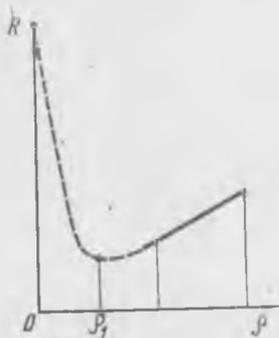


Рис. 3.11. Зависимость сопротивления деформации R от числа дефектов ρ в единице объема

ствия связано с увеличением ее длины и резким искажением решетки, требующим затраты дополнительной работы. Сущность упрочнения кристалла при возникновении дефектов и состоит в том, что на участке преодоления дефекта дислокация испытывает значительно большее сопротивление перемещению, чем в неискаженных областях решетки. Особенно сильное тормозящее действие оказывают границы блоков, зерен и обособленные включения, содержащиеся в решетке.

Явления упрочнения при холодном деформировании (наклеп), при введении примесных атомов (легирование), искусственное формирование в сплавах обособленных включений (закалка) находят широкое практическое применение.

Из всего сказанного следует, что дефекты решетки оказывают на сопротивление кристалла деформации двоякое влияние: способствуя образованию дислокаций, они ослабляют кристалл; а препятствуя свободному перемещению дислокаций, упрочняют его.

На рис. 3.11 показано влияние количества дефектов на прочность кристалла. Точка ρ_1 соответствует такой плотности дислокаций, при которой сопротивление кристалла деформациям минимально. Увеличение числа дефектов вызывает повышение прочности вследствие увеличения сопротивления перемещению дислокаций. Применяющиеся в настоящее время методы упрочнения (наклеп, легирование, термообработка) соответствуют правой пологой ветви кривой. Методы упрочнения, соответствующие левой ветви, приводят к получению бездефектных кристаллов. Уже сейчас получены тонкие нитевидные кристаллы со структурой, приближающейся к идеальной. Так, у нитевидных кристаллов железа предел прочности равен 13 360 МПа (в обычном состоянии около 300 МПа), у меди — 3020 (260 МПа), у цинка — 2250 МПа (180 МПа). Упругая деформация нитевидных кристаллов достигает нескольких процентов, в то время как у обычных не превышает сотых долей процента.

Выше были приведены приближенные методы подсчета теоретической прочности кристаллических материалов.

Истинная прочность реальных материалов на 3...4 порядка ниже

теоретической и, например, для керамики составляет $10...10^2$ МПа. Такое большое снижение прочности нельзя объяснить уменьшением рабочей площади поперечного сечения образца за счет пор, каверн, так как при ослаблении прочности, допустим в 10^3 раз, каверны должны были бы занимать 99,9% площади поперечного сечения образца.

Наличием различных дефектов кристаллической решетки, как показано выше, также нельзя объяснить столь большую разницу в теоретической и реальной прочности.

Гриффитс показал, что разница между теоретической и действительной прочностью твердых тел является следствием содержания в них мелких трещин, у которых происходит сильная концентрация напряжений. Основная идея, использованная Гриффитсом, заключается в том, что под действием приложенного растягивающего напряжения на краях микротрещин возникает локальное перенапряжение σ^* (рис. 3.12), которое во много раз превосходит среднее напряжение σ , рассчитанное на все сечение образца. Если перенапряжение у вершины наиболее опасной трещины достигнет теоретической прочности σ_T , то происходит катастрофическое (со скоростью, близкой к скорости звука) разрастание трещины и образец разделяется на части. Приложенное среднее напряжение в этот момент соответствует критическому напряжению σ_K . При перенапряжениях, меньше теоретической прочности, трещина не растет и материал не разрушается. Коэффициент концентрации напряжений в вершине микротрещины равен $\beta = \sigma^*/\sigma$. Он зависит от формы, размеров, ориентации микротрещины по отношению к направлению растяжения. Поэтому критическое напряжение не является константой материала. Разные образцы имеют разные по размерам наиболее опасные микротрещины.

При обосновании формулы для расчета критического напряжения Гриффитс исходил из следующих положений:

а) разрушение хрупкого материала атермично, т. е. не зависит от температуры; б) рост микротрещины может происходить в том случае, если уменьшение упругой энергии в образце (за счет разгрузки материала вокруг растущей микротрещины) равно (или больше) увеличению свободной поверхностной энергии, возникающей при образовании новых поверхностей (т. е. соблюдено условие $-da = d\epsilon$, где da — уменьшение свободной поверхностной энергии, $d\epsilon$ — увеличение упругой энергии); в) длина микротрещины намного меньше поперечного сечения образца и напряжение в сечении трещины практически совпадает со средним напряжением, рассчитанным на номинальную прочность.

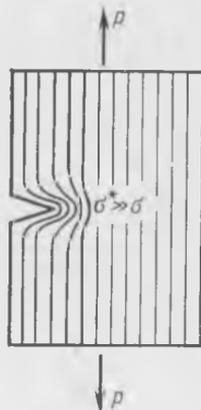


Рис. 3.12. Схема концентрации напряжений у вершины трещины

Основываясь на этих положениях, Гриффитс определил критическое напряжение

$$\sigma_k = \sqrt{2\alpha E/l_0}, \quad (3.12)$$

где α — свободная поверхностная энергия упругого тела; E — модуль упругости; l_0 — глубина начальной краевой микротрещины.

По современным воззрениям теория Гриффитса имеет ряд недостатков. Основные из них: 1) расчет критического напряжения из равенства изменения упругой энергии и изменения свободной поверхностной энергии ($-d\alpha = d\varepsilon$) принципиально неверен, так как по закону сохранения энергии $-d\alpha = d\varepsilon + dQ$, т. е. должны учитываться механические потери энергии при разрушении хрупких тел; 2) теория Гриффитса не учитывает временную зависимость прочности; 3) не учитывается молекулярная структура.

Для пояснения последнего положения рассмотрим молекулярную модель микротрещины и механизм ее роста в хрупком твердом теле. На границе перехода от сплошности к свободной поверхности

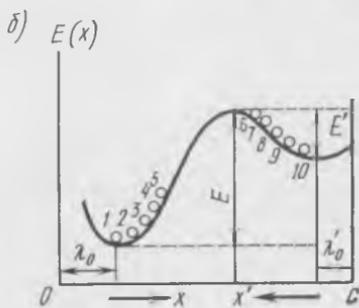
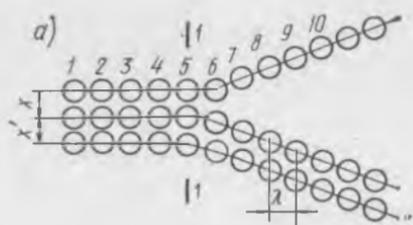


Рис. 3.13. Молекулярная модель микротрещины *a* и изменение потенциальной энергии *b*

лени растяжения, т. е. $f(x) \rightarrow f(x')$.

В ненагруженном теле $x = \lambda_0$ и $x' = \lambda_0'$, что соответствует равновесному межатомному расстоянию в поверхностном слое. Максимум на потенциальной кривой возникает вследствие того, что на процесс разрыва связей влияют ближайшие соседи следующих атомных слоев. В разгруженном материале вероятность нахождения частиц в зоне x больше, чем в зоне x' . После разгрузки трещина смыкается вплоть до дефекта, на котором она образовалась. В на-

(рис. 3.13, линия 1—1) происходит разрыв связи между атомами. Атомы 1 ... 5 еще находятся в объеме тела, а 6 ... 10 — на свободной поверхности. За счет теплового движения и флуктуаций атомы в вершине трещины время от времени приобретают достаточную кинетическую энергию для разрыва или же для восстановления разорванной между ними связи. Этот процесс сопровождается затратой энергии на преодоление потенциальных барьеров E и E' . Кинетические энергии частиц являются энергиями активации процессов разрыва или восстановления химических связей. Разность $E - E'$ — есть потенциальная поверхностная энергия, которую с некоторым приближением можно рассматривать как функцию расстояния между частицами в направ-

груженном материале растягивающее напряжение способствует разрыву связей и препятствует их восстановлению, следовательно, для разрыва связей требуется меньшая, а для восстановления большая кинетическая энергия, чем в ненагруженном состоянии. При больших напряжениях более вероятным становится разрыв связей и микротрещина растет. Напряжение $\sigma = \sigma_0$, при котором вероятности разрыва и восстановления связей равны, считается безопасным.

Таким образом, по современным воззрениям существуют два механизма разрушения. На первой стадии трещины обуславливаются термофлуктуацией, на второй — рост трещины определяется в основном упругими свойствами твердого тела и запасом энергии в нем.

Дальнейшее развитие теории Гриффитса шло в направлении уточнения факторов, вызывающих образование и развитие микротрещин, как основной причины, объясняющей начало разрушения реальных материалов.

И атермичная теория Гриффитса, и современная молекулярная теория разрушения однозначно говорят о том, что начало разрушения реального материала связано с наличием микротрещин на его поверхности. Ответить однозначно о причинах их образования нельзя. Этих причин может быть несколько. Вот основные из них: 1) механические повреждения поверхности в процессе технологии получения готового материала; 2) различие коэффициентов термического расширения отдельных фаз поликристаллического материала; 3) химическая коррозия поверхности как в процессе производства материала, так и в период его службы; 4) слияние дислокаций в процессе пластической деформации материала.

Действительно, процесс получения готового материала всегда связан с его первоначальной механической переработкой. Для сырьевых материалов — это карьерные работы по их добыче, последующее измельчение и классификация, для формованных материалов — это процесс перемешивания исходных компонентов и их формование. На всех этих переделах поверхности первичных исходных компонентов испытывают значительные механические воздействия, приводящие к образованию не только микро-, а зачастую и макротрещин. Здесь речь идет не о технологических трещинах изделий, а о дефектах на поверхности отдельных компонентов.

Большинство строительных материалов в процессе изготовления подвергаются термической обработке. Разница в коэффициентах термического расширения может являться также причиной образования поверхностных трещин. И опять-таки речь идет не о технологических термических трещинах, возникающих, допустим, между зернами шамота и глины, а о трещинах в самом шамоте или глине, как материалах, имеющих многофазовое строение.

Известно, что свежая обнаженная поверхность многих минералов обладает повышенной химической активностью. Адсорбирование этой поверхностью чужеродных ионов или молекул другого вещества может привести к химической коррозии и частичному разрушению поверхностного слоя. Например, разрушение кварца начинается с разрушения связей Si—O с образованием поверхност-

ной трещины в структуре самого кристалла. При этом на поверхности трещины образуются ионы Si и O — с ненасыщенными валентными связями. Такая поверхность имеет высокую энергию и и очень реакционноспособна, на ней сразу же адсорбируются атомы кислорода из окружающего воздуха, что приводит к снижению поверхностной энергии.

На дислокационных причинах образования трещин следует остановиться несколько подробнее. Пусть кристалл не имеет дефектов типа дислокаций. Предположим, что мы хотели сдвинуть верхнюю половинку кристалла по отношению к нижней на одно межатомное расстояние (рис. 3.14, а). Для этого придется «перекатить» друг через друга все ряды атомов, расположенные в плоскости сдвига.

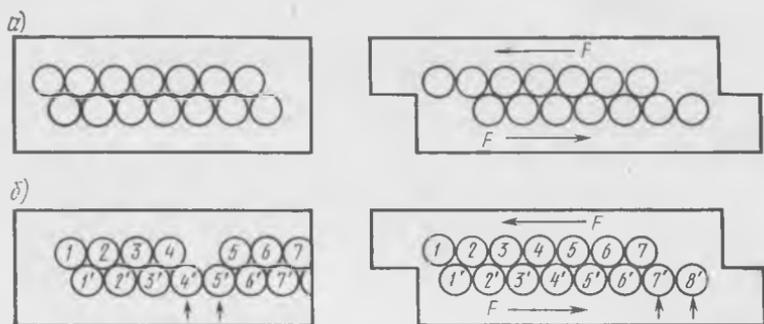


Рис. 3.14. Схема сдвига идеального кристалла *a* и кристалла, имеющего дислокацию *б*

Совершенно иначе обстоит дело при действии силы сдвига на кристалл, имеющий дислокацию (рис. 3.14, б). Для простоты положим, что дислокация захватывает минимальное число рядов, а еще лучше, является точечным дефектом типа Френкеля. Тогда можно сказать, что наличие дислокации сводится к тому, что между двумя рядами верхней (растянутой) плоскости имеется линейная пустота. В нижней (сжатой) плоскости, примыкающей к границе раздела блоков, имеется лишний ряд атомов. Внедрение этого ряда приводит к тому, что два ряда атомов, находящихся под пустотой, чрезмерно сжаты.

В какой-то исходный момент пустота была между атомами 4 и 5, а атомы 4' и 5' сжаты. При действии силы F ряды 5 и 6 сдвинуты в пустоту. Что же произошло? Вся дислокация сдвинулась вправо, и ее движение будет продолжаться таким же образом, пока дислокация не выйдет за пределы кристалла. Результатом будет сдвиг на один ряд атомов, т. е. такой же, как и при сдвиге идеального кристалла. Не надо доказывать, что во втором случае сдвигающее усилие значительно меньше. В первом случае надо преодолеть взаимодействие всего ряда атомов, во втором — только части атомов. Перемещение нескольких дислокаций, находящихся

в одной плоскости, может привести к их слиянию и, как следствие, к образованию зародыша трещины.

Поясним это следующим примером. Пусть кристалл имеет несколько дислокаций в плоскости сдвига, а плоскость заканчивается внедрением чужеродного атома, силы связи которого с соседними атомами кристаллической решетки значительно больше, чем атомарные связи самого кристалла. И тогда передвижение первой дислокации закончится не выходом ее из кристалла, а передвижкой атомов до упора к чужеродному атому. Сдвиг атомов второй и третьей дислокации приведет к уплотнению атомов левой части кристалла и суммированию пустот в правой. Но таких дислокаций в реальном кристалле может быть много. Сумма всех пустот отдельных дислокаций может превратиться в трещину на поверхности кристалла. Учитывая, что такими упорами в реальных кристаллах являются не только чужеродные атомы, но и границы кристаллов, дефекты Шоттки и т. п., то свободному перемещению дислокаций имеется много препятствий. Наличие таких препятствий может привести как к упрочнению кристаллической решетки (о чем говорилось выше), так и к появлению поверхностных трещин. Все зависит от распределения таких упоров в кристалле, соосности прилагаемой силы с направлением дислокационных линий, распределения самих дислокаций.

Таким образом, первоначальные механические повреждения поверхности, различия коэффициентов термического расширения отдельных твердых фаз структуры, химическая коррозия и наличие дислокаций являются причинами появления трещин.

Наличие же самих трещин, как было показано, приводит к снижению прочности материала и, как следствие, уменьшению усилий для его измельчения.

§ 3.4. Физико-химическая активация процесса измельчения

Измельчение твердых тел можно значительно активизировать, используя эффект адсорбционного понижения прочности. Этот эффект впервые был установлен П. А. Ребиндером и нашел широкое практическое применение.

Все твердые тела имеют поверхностные и внутренние дефекты. При нагружении тела, вызывающем упругие и пластические деформации, развиваются уже имеющиеся дефекты и возникают новые. Разрушение тел облегчается, если каким-либо образом способствовать развитию этих дефектов. Адсорбционное понижение прочности и заключается в развитии разнообразных дефектов при меньших напряжениях. Схематически мельчайшие трещины на поверхности материала можно рассматривать как клиновидные щели. В устье (т. е. на поверхности материала) обе стороны щели обладают всеми свойствами поверхности с присущей ей поверхностной энергией α . По мере удаления в глубину микрощели свободная поверхностная энергия убывает от α до нуля в конце трещины.

Наличие микротрещин позволяет окружающей среде проникать в поверхностный слой материала. Если окружающая среда жидкость, то она образует в трещинах тончайшие пленки, обладающие значительным избытком свободной энергии, возрастающим с уменьшением толщины пленки. Чтобы уменьшить свободную энергию, пленка жидкости стремится «утолститься» в микротрещине, т. е. оказывает расклинивающее давление (по Дерягину) на стенки трещины. Это давление максимально в самом конце трещины, до которого может проникнуть жидкость. Расклинивающее давление жидкости весьма значительно (для воды порядка 250 МПа в наиболее узких местах трещины) и определяется энергией смачивания данной жидкости поверхности данного тела ($\alpha_{ж}$). Капиллярное давление $P_{к}$, характеризующее всасывающую силу,

$$P_{к} = 2\alpha_{ж} \cos \theta / r,$$

где θ — краевой угол смачивания; r — ширина щели.

Вместе с тем кинетика всасывания зависит от вязкости жидкости η

$$dl/dt = [r^2 \rho / (8\eta)] [P_{к} / (\rho l) - g \sin \varphi],$$

где l — длина столба жидкости в капилляре; t — время всасывания; ρ — плотность жидкости; φ — угол наклона капилляра к горизонту.

Отсюда следует, что для усиления эффекта расклинивающего действия необходима значительная выдержка для достаточно полного всасывания жидкости в весьма узкие микрощели, где ее действие особо эффективно.

Разрушение твердого тела под влиянием данной жидкости можно интенсифицировать, добавляя поверхностно-активные вещества (ПАВ). ПАВ повышает энергию смачивания тела жидкостью. Молекулы ПАВ мигрируют по адсорбирующей поверхности твердого тела, проникая в микрощели и покрывая ее стенки равномерным адсорбционным слоем (обычно мономолекулярным). Глубина проникновения ПАВ ограничивается размером адсорбируемых молекул. Движущая сила втягивания адсорбционных слоев в трещины

$$P_{а} = \alpha_0 - \alpha_{г},$$

где α_0 — поверхностная энергия твердого тела; $\alpha_{г}$ — то же, покрытого молекулами ПАВ.

Адсорбционные эффекты специфичны и зависят от минералогического состава породы. Для каждого минерала существуют наиболее эффективные ПАВ, понижающие прочность с весьма узкими колебаниями оптимальных концентраций. Например, для кварца эффективны $AlCl_3$, $NaCl$, $MgCl_2$ и нафтеновое мыло; для карбонатных пород (известняков, доломитов) — щелочные электролиты; для глинистых пород — хлористый натрий.

Жидкость в процессе измельчения диссоциирует, а продукты диссоциации, которые в момент их образования весьма активны, способны образовывать прочные соединения с поверхностью измельчаемого материала.

§ 3.5. Кинетика измельчения и размолоспособность

Под *кинетикой измельчения* понимают закономерности протекания процесса во времени. Рассматривая выше законы измельчения, было указано, что с увеличением степени измельчения работа на проведение этого процесса увеличивается, или, другими словами, уменьшается скорость измельчения и увеличивается время на получение продукта необходимой дисперсности.

Для различных агрегатов и вида измельчаемого материала выведен ряд эмпирических формул, связывающих время измельчения с дисперсностью измельчаемого продукта. Эти формулы носят название кинетических уравнений. Например, для помола кварца в вибромельнице константа скорости измельчения

$$K_t = \ln \frac{s_m}{s_m - s}, \quad (3.13)$$

где s_m — удельная поверхность предельно измельченного порошка с частицами размером $x < x_m$; x_m — граничный размер неизмельчающихся в данном режиме частиц; s — удельная поверхность измельчаемого материала.

Константы скорости измельчения K_t коррелируются некоторыми физическими свойствами измельчаемого материала. Большим значениям этой константы соответствуют меньшие значения ударной вязкости, меньшие коэффициенты термического расширения, большие значения модуля сдвига. Указанные соотношения свидетельствуют о том, что более хрупкие материалы имеют большие скорости измельчения.

Для процессов помола В. В. Товаровым и В. П. Романдиным предложено уравнение:

$$R_t/R_0 = 10^{-kt^m}, \quad (3.14)$$

где R_0 и R_t — суммарный остаток на сите соответственно перед началом измельчения и к моменту времени t , %; m и k — постоянные; t — время измельчения.

В. В. Товаров показал, что между удельной поверхностью и удельным расходом электроэнергии имеется зависимость типа Риттингера:

$$\Delta s = f(E). \quad (3.15)$$

Из графиков, построенных по результатам опытов В. В. Товарова при помоле шлака, песка, клинкера и известняка (рис. 3.15), следует, что при малом изменении удельной

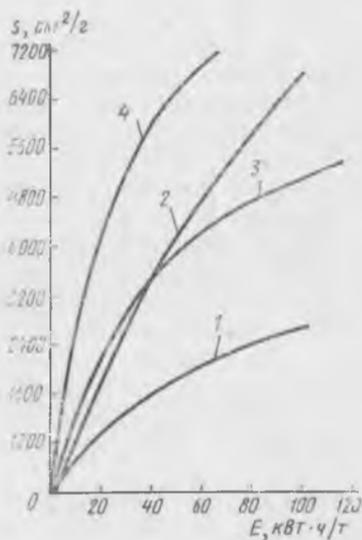


Рис. 3.15. Зависимость удельного расхода электроэнергии E от удельной поверхности s готового продукта:

1 — доменный шлак; 2 — кварцевый песок; 3 — клинкер; 4 — известняк

поверхности ее прирост Δs почти пропорционален затраченной энергии E (гипотеза Риттингера). При значительном увеличении удельной поверхности закон прямой пропорциональности нарушается и поверхность растет значительно меньше, чем работа.

Анализ теоретических и экспериментальных работ показал, что для этих целей применима формула В. А. Олевского

$$\Delta s = K_0 E \lg C/E, \quad (3.16)$$

где Δs — прирост удельной поверхности; E — удельный расход электроэнергии; K_0 и C — постоянные, зависящие от физико-механических свойств материала и условий помола.

В качестве технической характеристики кинетики измельчения для практических целей часто применяют коэффициент размолоспособности сырья.

Коэффициент размолоспособности есть отношение удельной производительности измельчителя по исследуемому q_m и по эталонному $q_э$ материалам

$$k = q_m/q_э. \quad (3.17)$$

Удельная производительность измельчителя

$$q_m = m/(Vt), \quad (3.18)$$

где m — масса материала; V — объем измельчителя; t — продолжительность измельчения до контрольной крупности.

Назначение процесса измельчения в технологии строительных материалов различно в зависимости от размеров конечного продукта. Дробление связано с получением конечного продукта относительно больших размеров, которые определяются чисто механическими особенностями смесей — возможностью получения наиболее плотного скелета. Помол помимо этой цели преследует еще и увеличение скорости протекания различных химических процессов.

Применение тонкомолотого материала в промышленности строительных материалов связано с тем, что при высокой степени дисперсности твердой фазы резко увеличивается скорость химических процессов в любых системах: гетерогенных, одно- и многокомпонентных. Объясняется это не только огромным развитием реакционной поверхности, но и повышением ее удельной реакционной способности.

Например, зависимость растворимости твердой фазы от размера частиц выражается уравнением

$$\ln \frac{S_r}{S_\infty} = \frac{2\alpha_{r,g}V}{RT}, \quad (3.19)$$

где S_r — растворимость частицы с радиусом r ; S_∞ — растворимость частицы с плоской поверхностью; $\alpha_{r,g}$ — поверхностная энергия на границе раздела твердое тело — газ; V — молярный объем твердой фазы, $V = \mu/\rho$; μ — молекулярная масса; ρ — плотность; R — молярная газовая постоянная; T — абсолютная температура.

По закону Фика, увеличивается и скорость растворения

$$dV/dt = -DA(dc/dx), \quad (3.20)$$

где V — объем твердой фазы, перешедшей в раствор; t — время; D — коэффициент диффузии; A — поверхность взаимодействия твердой фазы с растворителем; c — концентрация твердой фазы в зоне растворения; x — толщина зоны растворения.

Для дисперсных частиц характерно также понижение температуры фазовых превращений

$$(T_{\infty} - T_r)/T_{\infty} = 2\alpha_m/(Q\rho r), \quad (3.21)$$

где T_{∞} и T_r — температуры фазового превращения крупных и тонких частиц; Q — теплота превращения.

Высокая химическая активность тонкоизмельченной твердой фазы объясняется как аморфизацией поверхностного слоя зерен, так и образованием на поверхности свободных радикалов.

Из приведенных выше рассуждений о повышении реакционной способности тонкодисперсных частиц следует, что в практической деятельности технологу всегда необходимо учитывать экономический фактор. Ведь даже незначительный домол, например, цементного клинкера или кварцевого песка исходя из общих закономерностей кинетики измельчения резко увеличивает затраты энергии. На рис. 3.16 приведены кривые прироста прочности цемента от его удельной поверхности. Сравнивая кривую 2 (рис. 3.16) с кривой 3 (рис. 3.15), нетрудно подсчитать, что увеличение активности цемента с 50 до 70 МПа (на 40%) повлечет за собой увеличение энергозатрат примерно с 20 до 50 кВт·ч, т. е. в 2,5 раза. Что на данном этапе технического развития выгоднее, представляется решать совместно технологу и экономисту.

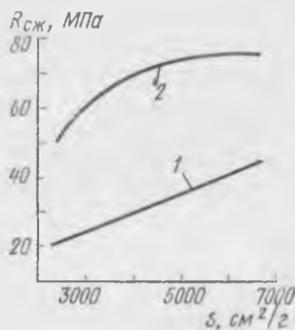


Рис. 3.16. Зависимость прочности $R_{сж}$ портландцемента от удельной поверхности S :
1 — через 1 сут; 2 — через 28 сут

§ 3.6. Методы механической классификации грубозернистых и дисперсных материалов

Разделение твердых зернистых материалов на классы по крупности кусков или зерен называется *классификацией*. Известны два основных вида классификации: механическая — разделение на ситах и гидравлическая, основанная на различной скорости осажде-ния зерен разной крупности в водной или воздушной среде (см. гл. 7).

Процесс разделения сыпучих материалов на классы по крупности путем просеивания через сита называется *грохочением*.

Вне зависимости от метода разделения, классификация преследует две цели. При многостадийном измельчении отделяют зерна, достигшие заданных размеров, и подвергают дальнейшему измельчению только более крупные зерна. Готовый же продукт разделяют на более узкие фракции для того, чтобы обеспечить получение плотного скелета путем подбора необходимых фракций.

При отсеивании на каждом сите образуются два продукта — верхний, не прошедший через сито, и нижний. При отсеивании материала через m сит, количество фракций равно $m+1$. Фракции обычно обозначают по размерам отверстий двух соседних сит: одно — то, через которое прошел материал, другое — на котором он задержался.

Существуют три основных схемы отсеивания: 1) с последовательным выделением фракций от крупных к мелким; 2) то же, от мелких к крупным; 3) комбинированный. При использовании первой схемы крупность кусков уменьшается и, следовательно, уменьшается износ полотен сит, повышается точность отсеивания. Однако удаление мелких фракций на последних ступенях отсеивания значительно увеличивает пыление, особенно при классификации дисперсных материалов. Применение второй схемы исключает этот недостаток, но увеличивает износ полотен и понижает точность отсеивания. На рис. 3.17 показаны принципиальные схемы отсеивания. Одиночными

цифрами обозначены размеры отверстий сит, интервалами — граничные размеры фракций.

Прежде чем рассматривать сами методы разделения материалов, необходимо установить характеристики, по которым материал классифицируется по крупности.

Распределение кусков материала по классам крупности характеризует зерновой состав ис-

Таблица 3.3. Результаты ситового анализа песка

Размеры отверстий сит, мм	Остатки, %	
	частные	полные
2,5	8	8
1,25	15	23
0,63	42	55
0,315	22	87
0,14	13	100

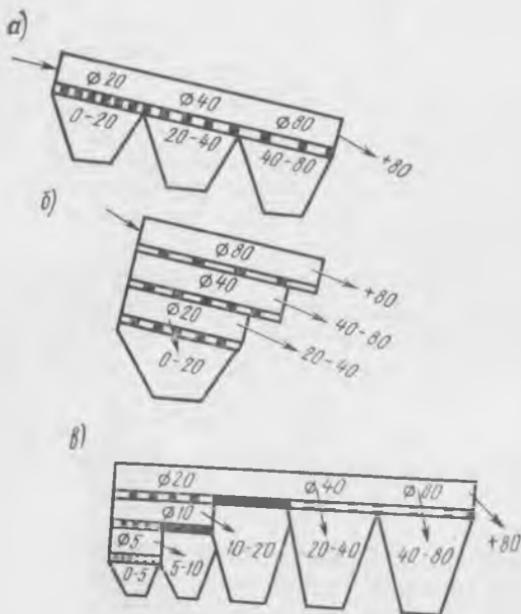


Рис. 3.17. Принципиальные схемы отсеивания:

а — от мелкого к крупному; *б* — от крупного к мелкому; *в* — комбинированная

ходного сырья и продуктов обогащения. В качестве примера в табл. 3.3 приведен зерновой состав песка.

Кривые, графически изображающие зерновой состав материала, называются характеристиками крупности. Различают характеристики частные, суммарные и кривые распределения. Частная характеристика отображает процентный выход отдельных классов крупности и имеет вид гистограммы-диаграммы из серии прямоугольников. Основаниями их служат отрезки между размерами сит, ограничивающие данный класс, а высотой — отрезки, характеризующие выход отдельных классов в процентах (рис. 3.18). Если на оси абсцисс с соответствующим интервалом отложить порядковый номер сита (размер сита), на оси ординат — процентные остатки на этих ситах, то получают кривую распределения.*

Суммарные (кумулятивные) кривые строят по данным частных остатков, суммируя их по нарастающим итогам. В промышленности строительных материалов принято построение частных и суммарных кривых распределения по остаткам на ситах начиная с самых мелких, т. е. «по плюсу». В других отраслях часто применяют построение кривых по проходу через определенные сита начиная с самых крупных («по минусу»).

Выход отдельного узкого класса по суммарной характеристике можно найти как разность ординат верхнего и нижнего пределов данного класса. Например, частный остаток на сите 0,63, определенный по кривой 3 рис. 3.18, составит разность между полным остатком на ситах 0,63 и 1,25, т. е. $65 - 23 = 42\%$.

Известен ряд формул, отображающих функциональную зависимость между выходом отдельных классов γ и их крупностью d , или между полным остатком a и крупностью. Например, для мелких классов продуктов дробления и помола С. Е. Андреевым предложена расчетная формула

$$(100 - a) = 100(d/d_{\max})^k, \quad (3.22)$$

где a — полный остаток на сите с отверстиями d , %; d_{\max} — размер максимального сита, на котором остаток равен нулю; k — показатель, характеризующий степень кривизны кумулятивной кривой, $k = 0,7 \dots 1$.

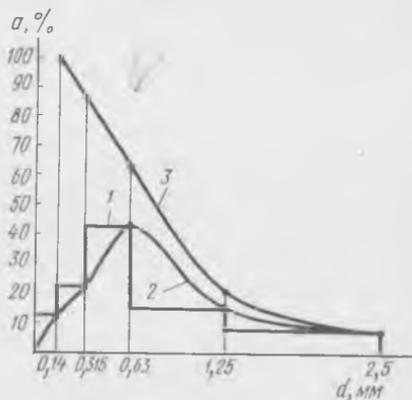


Рис. 3.18. Характеристика крупности материала (по данным табл. 3.3):

1 — гистограмма по частным остаткам; 2 — кривая распределения по частным остаткам; 3 — кумулятивная кривая (полные остатки)

* В горно-обогатительной промышленности принят иной подход к построению этой кривой.

Формула справедлива для суммарной характеристики «по минусу».

Широкое применение для оценки крупности материала получила формула Розина — Раммлера

$$100/a = e^{md^n}, \quad (3.23)$$

где a — суммарный остаток на сите d , %; m и n — постоянные коэффициента, характерные для данного материала.

Обычно размер зерна материала характеризуется номинальным (условным) диаметром. За эту величину при ситовом анализе принимают диаметр круглого (или сторону квадратного) отверстия сита, определяющего размеры наибольших проходящих через него кусков. Тогда интервал отдельных фракций можно характеризовать разностью соседних условных диаметров. Однако чаще величину зерен характеризуют не интервалом фракций, а средними размерами фракций, которые вычисляются различно; при этом результаты будут неодинаковы.

Если зерно можно измерить по трем основным направлениям — длине l , ширине b , толщине t , то его размер оценивают по среднему размеру, например $d_1 = b$; по среднеарифметическому из двух наибольших размеров $d_2 = (l+t)/2$ или из трех размеров $d_3 = (l+b+t)/3$; по среднему геометрическому из двух $d_4 = \sqrt{lb}$ или трех размеров $d_5 = \sqrt{lb}$; по среднегармоническому из двух $d_6 = 2lb/(l+b)$ или трех размеров $d_7 = 3lbt/(l+b+t)$. Эти и любые другие способы расчета исходных данных наименьшие по d_7 и наибольшие по d_2 .

Если больший условный диаметр обозначить через D , меньший — через d , а отношение $D/d = n$, то значения среднего размера зерен данной фракции будут: среднее арифметическое $d_2 = 0,5(n+1)d$; среднее геометрическое $d_4 = \sqrt{nd}$; среднее гармоническое $d_6 = 2nd/(n+1)$.

Полученные таким образом размеры будут тем больше различаться, чем больше n . Пример такого расчета представлен в табл. 3.4.

Поскольку в железобетонной промышленности, например, принят шаг сит около 2 (по щебню — 5; 10; 20; 40; 80; по песку — 5; 2,5; 1,25; 0,63; 0,315; 0,14),

Таблица 3.4. Сопоставление значений среднего диаметра фракции в зависимости от метода расчета

Метод расчета среднего	D/d при n			
	1,5	2	3	8
Арифметического	1,25	1,5	2,00	4,5
Геометрического	1,23	1,41	1,73	2,83
Гармонического	1,20	1,33	1,5	1,78

следовательно ошибка в подсчете $d_{\text{ср}}$ отдельных узких фракций может достигать до 17%, причем она будет тем больше, чем меньше $d_{\text{ср}}$.

Термин «средний диаметр» иногда применяют для всего продукта, состоящего из смеси частиц различных узких классов. На

практике часто используется среднеарифметический по весу частиц (средневзвешенный диаметр), вычисляемый по формуле

$$d_{cp} = \frac{\sum \gamma d_i}{\sum \gamma}, \quad (3.24)$$

или в развернутом виде

$$d_{cp} = \frac{\gamma_1 d_1 + \gamma_2 d_2 + \gamma_3 d_3 + \dots + \gamma_n d_n}{\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 + \dots + \gamma_n}, \quad (3.25)$$

где γ — частные остатки на ситах, %; d_i — диаметр, принимаемый за средний для данного узкого класса, мм.

Можно также пользоваться среднегармоническим по весовому выходу, который подсчитывается по формуле

$$d_{cp} = \frac{\sum \gamma}{\sum \gamma / d_i}, \quad (3.26)$$

или в развернутом виде

$$d_{cp} = \frac{\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 + \dots + \gamma_n}{\gamma_1 / d_1 + \gamma_2 / d_2 + \gamma_3 / d_3 + \dots + \gamma_n / d_n}. \quad (3.27)$$

Так, средние диаметры, подсчитанные для данных табл. 3.3 по формулам (3.25) и (3.27), соответственно составят 1,12 мм и 0,695 мм, при этом разница в вычислениях равна 61%.

Анализ табл. 3.4 показывает, что разница в методах среднегармонического подсчета с увеличением отношения D/d значительно меньше, чем при определении среднеарифметического. Отсюда следует, что метод среднеарифметического расчета может быть использован только для узких классов крупности. При переходе к более широким классам (увеличение D/d) и тем более при подсчете d_{cp} для всего продукта следует пользоваться среднегармоническим.

Итак, основная задача рассева — отделение зерен заданной фракции. Предельным является случай, когда в выделенной фракции не содержится зерен, которые должны были бы пройти через сито. Это возможно лишь в том случае, если зерно перемещается перпендикулярно плоскости сита и геометрический центр зерна совпадает с центром отверстия сита. Практически этот случай не реализуем.

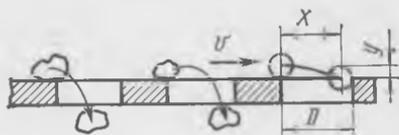


Рис. 3.19. Условия прохождения зерна через отверстие сита

Рассмотрим условия прохождения зерна через сито (рис. 3.19). Пусть зерно формы, близкой к сферической, движется по ситовому полотну со скоростью v . Диаметр отверстия сита D в несколько раз больше диаметра зерна d .

Если принять траекторию движения центра тяжести зерна при прохождении через отверстие параболической, то его вертикальное

перемещение y ко времени t можно описать уравнением параболы:

$$y = gt^2/2. \quad (3.28)$$

Принимая $y=0,5d$ и $x=D-0,5d=vt$, соответствующей подстановкой в формулу (3.28) получаем

$$v = (D - 0,5d)/t = (D - 0,5d) \sqrt{g/d}. \quad (3.29)$$

Таким образом, возможность прохождения зерна через отверстие сита зависит от ряда условий: соотношения размеров зерна и отверстия, скорости движения зерна, формы зерна и сечения отверстия, толщины ситового полотна и его живого сечения. Сделав ряд допущений, можно определить вероятность прохождения зерна через отверстие.

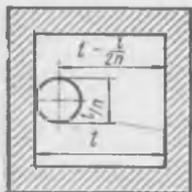


Рис. 3.20. К определению вероятности прохождения зерна через отверстие сита

Пусть зерно падает перпендикулярно ситу, отверстие сита прямоугольное, зерно попадает в отверстие, не касаясь стенок (рис. 3.20). При этих условиях возможность прохождения зерна через отверстие определяется неравенством:

$$P = (D - d)/d \geq 1, \text{ откуда } D \geq 2d. \quad (3.30)$$

В табл. 3.5 приведена вероятность прохождения зерен через квадратные отверстия и указано число необходимых отверстий, которое зерно должно встретить, чтобы достоверно пройти через сито.

Из приведенных данных следует, что при $D \geq d/0,8$ имеется реальная возможность прохождения зерна через сито. Трудность прохождения зерен при $d \geq 0,8D$ прогрессивно возрастает по мере приближения зерна к величине отверстий сита. Такие зерна называют «трудными». Точность просеивания уменьшается с увеличением содержания трудных зерен в исходном материале. Из рис. 3.19 видно, что удлинение отверстий в направлении движения материала при сохранении их ширины должно облегчить просев, особенно пластинчатых и продолговатых зерен. При этом из формулы (3.30) следует, что возможность их прохождения через такие отверстия увеличивается.

Качество просеивания зависит от ряда факторов, важнейшими из которых являются зерновой состав исходного материала, форма зерен и влажность материала, наличие глинистых примесей, скорость прохождения материала через сито, форма и толщина сит.

Таблица 3.5. Вероятность прохождения зерен через сито

d/D	Вероятность P прохождения через отверстия	Количество отверстий для $P=1$
0,001	0,998	1
0,01	0,98	2
0,05	0,81	2
0,1	0,36	3
0,4	0,25	4
0,5	0,04	25
0,8	0,0025	400
0,95	0,0001	10^4
0,99	0,000001	10^6

Форма зерен в значительной степени определяется кристаллической структурой минералов, от которой зависит наличие плоскостей спайности. Например, глинистые минералы обычно имеют форму пластинок, т. е. развиты в двух измерениях. Пластинчатые зерна просеиваются труднее, так как им присуща способность выноситься в верхние слои материала, проходящего по полотну сита.

Степень отклонения формы зерна от шара обычно оценивают коэффициентом сферичности ψ , представляющим отношение поверхности шара $A_{ш}$ к поверхности равновеликому по объему зерну A_3 :

$$\psi = A_{ш}/A_3. \quad (3.31)$$

Если, например, зерно имеет форму куба с ребром a , то отношение поверхности шара диаметром d к поверхности куба

$$\psi = \pi d^2 / (6a^3).$$

При равновеликости этих зерен по объему $a^3 = \pi d^3 / 6$, откуда $a = d \sqrt[3]{\pi/6}$. Тогда коэффициент сферичности куба $\psi = \sqrt[3]{\pi/6} = 0,806$.

По коэффициенту сферичности зерна разной геометрической формы могут приближаться к шару тем в большей степени, чем ближе их размеры в разных направлениях.

Процесс грохочения принято оценивать двумя показателями: производительностью Q — количеством поступающего на грохот исходного материала в единицу времени, и эффективностью грохочения E — отношением массы материала, прошедшей через сито, к массе материала данной крупности, содержащейся в исходном материале:

$$E = \frac{c-d}{c} 100\%, \quad (3.32)$$

где c — содержание по массе зерен нижнего класса в продукте питания, %; d — то же, не прошедших сквозь сито, %.

При грохочении существенное значение имеет влажность материала, в особенности при расसेве на ситах с мелкими отверстиями. Если при грохочении сухого материала достигается некоторая точность отсева ϵ , то по мере увеличения влажности она постепенно понижается. На рис. 3.21 показана зависимость точности отсева мелочи из дробленого известняка от содержания в нем влаги.

Начальный участок кривой, примерно до $W_{кр} = 8\%$, — слабо наклонная прямая. При критической влажности известняка кривая резко падает, так как происходит залипание отверстий грохота. В пределах

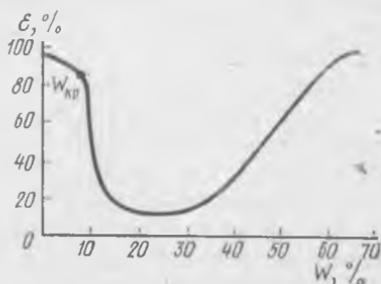


Рис. 3.21. Зависимость эффективности грохочения известняка от его влажности

12% < W < 40% грохочение практически прекращается — до 70% материала, подлежащего проходу, остается на сите. При дальнейшем увеличении влажности наступает переход к мокрому грохочению и эффективность снова повышается. При мокрому грохочению (W > 50%) с увеличением воды орошения эффективность грохочения приближается к 100%.

Кинетическое уравнение грохочения, предложенное В. А. Перовым, имеет вид

$$\varepsilon = 1 - e^{-kt^n}, \quad (3.33)$$

где ε — точность отсева, доли единицы; k и n — параметры, зависящие от свойств материала и условий грохочения.

Из уравнения следует, что с увеличением времени эффективность грохочения резко замедляется.

При переработке нерудных строительных материалов применяют следующие виды грохочения: *предварительное*, при котором из исходной массы выделяется негабаритный материал, либо материал, не требующий дробления; *контрольное*, применяемое для контроля крупности готового продукта и выделения отходов, зерна крупнее заданного размера возвращаются на повторное дробление; *окончательное* — для разделения продукта на товарные фракции.

Рабочей частью грохотов является просеивающая поверхность, которая может быть выполнена в виде сита — плетеной проволочной сетки, решета — стального листа с отверстиями или колосниковой решетки. В последнее время в качестве просеивающей поверхности используют резиновые штампованные или литые армированные листы — решета или сетки из резинового шнура — струнные сита. При грохочении материалов, склонных к налипанию, грохоты с такой рабочей частью имеют более высокую производительность и эффективность грохочения, так как вследствие возбуждения дополнительных колебаний в резине они почти не забиваются.

По принципу действия грохоты различных типов аналогичны: просеивание мелких классов через отверстия происходит в результате движения грохотимого материала относительно просеивающей поверхности.

Грохоты характеризуются следующими конструктивными особенностями: 1) геометрической формой просеивающей поверхности и конструкцией ее элементов; 2) расположением рабочего органа относительно горизонтальной плоскости; 3) характером движения просеивающей поверхности.

По *форме просеивающая поверхность* выполняется плоской, цилиндрической, многогранной призматической («бурат»).

По *расположению просеивающей поверхности* грохоты разделяют на наклонные, в которых перемещение материала осуществляется главным образом за счет силы тяжести, и горизонтальные (или слабонаклонные), где движение материала обусловлено в ос-

новном механическом воздействии рабочего органа — подбрасыванием или проталкиванием зерен грохотимого материала.

По характеру движения рабочего органа все грохоты могут быть разделены на группы: неподвижные, качающиеся, вибрирующие, вращающиеся. Характер движения рабочей поверхности является основным признаком для классификации грохотов. На рис. 3.22 показаны принципиальные схемы механических грохотов. В неподвижных грохотах (рис. 3.22, а) материал сползает по рабочей поверхности 1 под действием силы тяжести. Угол колосников к горизонту для сухих материалов принимают $\sim 35^\circ$ и увеличивают при влажных породах или для пород с глинистыми включениями до 40° . В качающихся грохотах (рис. 3.22, б) рабочая поверхность 1 совершает возвратно-поступательные движения, сообщаемые ей кривошипно-шатунным механизмом 2. Конструкции виброгрохотов весьма разнообразны. На рис. 3.22, в показан виброгрохот с инерционным приводом. Рабочий орган 4 на пружинах 1 совершает колебательные движения за счет центробежной силы, возбуждаемой дебалансами 2, установленными на валу 3. В виброгрохотах с направленными колебаниями (рис. 3.22, г) просеивающая поверхность 1 совершает колебательные движения под действием вибратора 2 с двойными дебалансами, вращающимися навстречу друг другу.

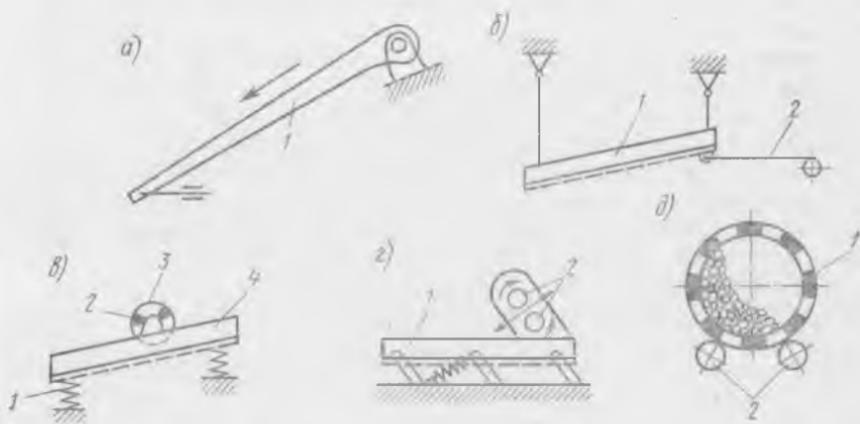


Рис. 3.22. Принципиальные схемы механических грохотов

Вращательное движение цилиндрической рабочей поверхности 1 барабанного грохота (рис. 3.22, д) сообщают приводные ролики 2. Материал, находящийся внутри барабана, движется по сложной прерывистой винтовой траектории и сортируется последовательно от мелкого к крупному. Разновидностью барабанного грохота является сито-бурат, рабочая поверхность которого выполнена в виде многогранника.

Глава 4. ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ

§ 4.1. Общие положения

Гидромеханика — это наука о движении жидкостей и газов. Законы гидромеханики и их практические приложения изучаются в гидравлике, состоящей из двух разделов — гидростатики, рассматривающей законы равновесия и состояние покоя, и гидродинамики, рассматривающей законы движения жидкостей и газов.

Гидромеханические процессы по принципу целенаправленности можно разделить на процессы, протекающие с образованием неоднородных систем и разделением их, а также процессы, связанные с перемещением потоков в трубопроводах и аппаратах.

Классификацию гидромеханических процессов можно подчинить и другому классификационному признаку: закономерностям, характеризующим условия движения потоков. Теоретическая гидродинамика рассматривает три группы гидромеханических процессов: процессы, составляющие внутреннюю задачу гидродинамики, например движение потоков по трубам и каналам; процессы, составляющие внешнюю задачу, например движение частицы, осаждающейся под действием силы тяжести; смешанную задачу, например движение потока жидкости или газа по каналам, образованным твердой фазой, т. е. обтекание твердых частиц жидкостью или газом.

В промышленности строительных материалов многие технологические операции (перемешивание литых и пластичных смесей, транспортирование их, а также различных дисперсных материалов с помощью пневмотранспорта, движение теплоносителя в печах и сушилках, формование изделий и др.) связаны с общими законами гидродинамики. Однако изучение этих законов невозможно без рассмотрения некоторых основных понятий гидростатики.

В гидравлике принято объединять жидкости, газы и пары под единым наименованием — жидкость. Объясняется это тем, что законы движения жидкостей и газов в интервале обычных инженерных расчетов одинаковы.

При выводе основных закономерностей в гидравлике вводят понятие об *идеальной жидкости*, которая в отличие от *реальной (вязкой) жидкости* абсолютно несжимаема под действием нагрузки, не изменяет плотности при изменении температуры и не обладает вязкостью. Реальные жидкости подразделяются на капельные и упругие. *Капельные жидкости* практически несжимаемы и незначительно изменяются в объеме при изменении температуры. Плотность их

$$\rho = m/V, \quad (4.1)$$

где m — масса жидкости; V — ее объем.

Объем *упругих жидкостей* (газов, паров) сильно изменяется при изменении температуры или давления. Плотность их с боль-

шей или меньшей степенью точности может быть рассчитана по уравнению состояния для идеальных газов

$$\rho = pM/(RT), \quad (4.2)$$

где p — давление; M — масса 1 кмоль газа; R — универсальная газовая постоянная; T — температура.

Жидкость оказывает давление на дно и стенки сосуда, в котором она находится, и на поверхность любого погруженного в нее тела.

Рассмотрим площадку ΔA , на которую действует сила ΔP (рис. 4.1). Отношение $\Delta P/\Delta A = p_{\text{ср}}$ представляет собой «напряжение», т. е. силу, приходящуюся на единицу площади. При равновесии жидкости ΔP является сжимающей силой и, следовательно, $p_{\text{ср}}$ представляет собой среднее для данной площади напряжение сжатия, называемое *средним гидростатическим давлением* на площадке. Предел этого отношения при $\Delta A \rightarrow 0$ называют *напряжением гидростатического давления* или просто *давлением в данной точке*

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} (\Delta P/\Delta A). \quad (4.3)$$



Рис. 4.1. К определению среднего гидростатического давления

Через каждую точку внутри жидкости может проходить бесчисленное множество элементарных площадок, на которые по нормали действует ΔP . Если бы ΔP действовала не по нормали, то ее можно было бы разложить на составляющие — нормальную и параллельную площадке. Последняя вызвала бы перемещение жидкости, что невозможно, так как по условию она находится в состоянии покоя.

Давление в любой точке жидкости одинаково по всем направлениям, иначе бы также происходило перемещение жидкости внутри занимаемого ею объема.

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

Пусть жидкость течет вдоль плоской стенки параллельными ей слоями (рис. 4.2). Вследствие тормозящего влияния стенки слои жидкости будут двигаться с разными скоростями, значения которых возрастают по мере удаления от стенки. Рассмотрим два слоя, двигающихся на расстоянии Δy друг от друга. Слой I движется со скоростью v , а слой II — со скоростью $v + \Delta v$. За определенную единицу времени вследствие разности скоростей слой II сдвинется по отношению к слою I на величину Δv , являющуюся абсолютным сдвигом слоя II по слою I . Отношение $\Delta v/\Delta y$, характеризующее относитель-

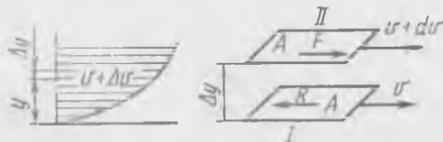


Рис. 4.2. К характеристике вязкости

цу времени вследствие разности скоростей слой II сдвинется по отношению к слою I на величину Δv , являющуюся абсолютным сдвигом слоя II по слою I . Отношение $\Delta v/\Delta y$, характеризующее относитель-

ный сдвиг, называется *градиентом скорости*. Для того чтобы сдвинуть слой II по слою I, к слою II необходимо приложить силу F тем большую, чем больше градиент скорости и площадь соприкосновения этих слоев. Следовательно, можно записать

$$F = \eta A (\Delta v / \Delta y), \quad (4.4)$$

где η — коэффициент пропорциональности.

Возникающая внутри жидкости сила сопротивления R равна приложенной силе F и направлена в противоположную сторону ($F = -R$). Отношение этой силы к поверхности соприкосновения слоев (A) обозначают через τ и называют *напряжением сдвига* ($\tau = R/A$). При малых Δv и Δy их можно заменить на dv и dy и записать

$$\tau = -\eta (dv/dy). \quad (4.5)$$

Уравнение (4.5) называют *законом внутреннего трения Ньютона*, а коэффициент пропорциональности η — *динамическим коэффициентом вязкости* (Па·с), *динамической вязкостью* или просто *вязкостью*.

Иногда вязкость жидкостей характеризуют *кинематическим коэффициентом вязкости* ($\text{м}^2/\text{с}$), или *кинематической вязкостью*:

$$\nu = \eta/\rho, \text{ тогда } \tau = -\rho\nu (dv/dy). \quad (4.6)$$

Жидкости, подчиняющиеся закону внутреннего трения Ньютона, часто называют *ньютоновскими*. В промышленной практике чаще приходится иметь дело с *неньютоновскими жидкостями*, обладающими аномальными свойствами. К ним относятся все пасты, суспензии, коллоидные растворы, многие полимеры (см. § 4.16).

§ 4.2. Гидростатика. Дифференциальные уравнения равновесия Эйлера

Выберем внутри покоящейся жидкости параллелепипед объемом dV с ребрами dx , dy и dz , расположенными параллельно координатным осям ox , oy и oz (рис. 4.3). Составим уравнения равновесия этого параллелепипеда в виде уравнения проекций сил. Согласно основному принципу статики, *сумма проекций сил, действующих на элементарный объем, находящийся в равновесии, равна нулю*.

Рассмотрим сумму проекций на ось z . На эту ось проектируются силы: тяжести, гидростатического давления на нижнюю грань и гидростатического давления на верхнюю грань.

Сила тяжести выразится произведением его массы dm на ускорение свободного падения g , т. е. равна gdm . При выбранном положительном направлении оси z сила тяжести будет проектироваться на эту ось со знаком минус: $-gdm = -g\rho dV = -\rho g dx dy dz$.

Сила гидростатического давления действует по нормали на

нижнюю грань, и ее проекция на ось z равна $pdx dy$. Если изменение гидростатического давления в данной точке в направлении оси z равно $\partial p/\partial z$, то по всей длине ребра dz оно составит $(\partial p/\partial z) dz$. Тогда гидростатическое давление на верхнюю грань параллелепипеда равно $p + (\partial p/\partial z) dz$ и проекция силы гидростатического давления на ось z равна $-\{p + (\partial p/\partial z) dz\} dx dy$.

Сумма проекций всех сил на ось z равна $-\rho g dx dy dz + p dx dy - \{p + (\partial p/\partial z) dz\} dx dy = 0$. Раскрыв скобки и произведя сокращение, получим $-\rho g dx dy dz + p dx dy - p dx dy - (\partial p/\partial z) dz dx dy = 0$. Учитывая, что объем параллелепипеда $dV = dx dy dz \neq 0$, получим $-\rho g - \partial p/\partial z = 0$. По аналогии (при отсутствии проекций силы тяжести), проекции на ось x и y равны

$$-(\partial p/\partial x) dx dy dz = 0; \quad -(\partial p/\partial y) dx dy dz = 0.$$

Так как $dV = dx dy dz \neq 0$, то $-\partial p/\partial x = 0$ и $\partial p/\partial y = 0$.

Таким образом, условия равновесия элементарного параллелепипеда выражаются системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} -\partial p/\partial x &= 0; \\ -\partial p/\partial y &= 0; \\ -\rho g - \partial p/\partial z &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (4.7)$$

носящих название *дифференциальных уравнений равновесия Эйлера*.

§ 4.3. Основное уравнение гидростатики и его практическое применение

Из дифференциальных уравнений равновесия следует, что давление в жидкости, находящейся в состоянии покоя, изменяется только по вертикали. Так как в этой системе уравнений частные производные $\partial p/\partial x$ и $\partial p/\partial y$ равны нулю, то частная производная $\partial p/\partial z$ может быть заменена на dp/dz : $-\rho g - dp/dz = 0$.

Разделив обе части уравнения на ρg и сделав ряд преобразований, можно написать $dz + dp/(\rho g) = 0$.

Для несжимаемой жидкости ρg постоянно, поэтому $d[z + p/(\rho g)] = 0$.

Проинтегрировав, получим

$$z + p/(\rho g) = \text{const.} \quad (4.8)$$

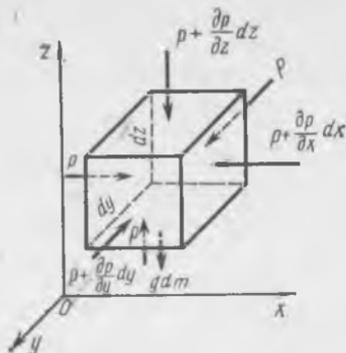


Рис. 4.3. К выводу дифференциальных уравнений равновесия Эйлера

Рассмотрим две частицы жидкости, находящейся в сосуде на расстоянии z_1 и z_2 от плоскости $O—O$ (рис. 4.4). На них действуют давления соответственно p_1 и p_2 . На основании уравнения (4.8) можно написать:

$$z_1 + p_1/(\rho g) = z_2 + p_2/(\rho g). \quad (4.9)$$

Уравнение (4.8) или (4.9) является *основным уравнением гидростатики*. Величину z называют *нивелирной высотой*, а $p/(\rho g)$ — *статическим*, или *пьезометрическим, напором*. Следовательно, основное уравнение гидростатики можно сформулировать следующим образом: для каждой точки покоящейся жидкости сумма нивелирной высоты и статического напора постоянна.

Члены основного уравнения гидростатики имеют определенный энергетический смысл. Так, z характеризует *удельную потенциальную энергию положения* данной точки над плоскостью сравнения и поэтому называется *геометрическим напором*, а $p/(\rho g)$ — *удельную потенциальную энергию давления* в этой точке и называется *статическим напором*. Сумма указанных энергий представляет общую потенциальную энергию, приходящуюся на единицу массы жидкости.

Следовательно, основное уравнение гидростатики является частным случаем закона сохранения энергии: **удельная потенциальная энергия во всех точках покоящейся жидкости есть величина постоянная.**

Следовательно, основное уравнение гидростатики является частным случаем закона сохранения энергии: **удельная потенциальная энергия во всех точках покоящейся жидкости есть величина постоянная.**

Уравнение (4.9) можно записать в виде

$$p_1 + \rho g z_1 = p_2 + \rho g z_2 \text{ или } p_1 = p_2 + \rho g (z_2 - z_1). \quad (4.10)$$

Последнее уравнение представляет закон Паскаля, согласно которому давление, создаваемое в любой точке несжимаемой жидкости, передается одинаково всем точкам ее объема.

На использовании основного уравнения гидростатики основана работа гидравлических прессов, применяемых в промышленности строительных материалов, например при производстве древесно-волоконистых и стеклопластиковых плит, кирпича полусухого прессования и других материалов. Гидравлические машины (прессы) широко используются и при испытании разного рода строительных материалов. Принципиальная схема прессы показана на рис. 4.5. Если к поршню небольшого диаметра d_1 приложить силу F_1 , то, согласно закону Паскаля,

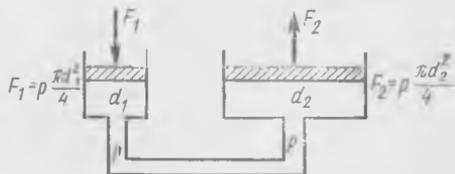


Рис. 4.5. Принципиальная схема гидравлического прессы

давления в обоих цилиндрах будут равны, а сила, действующая на поршень диаметром d_2 , будет во столько же раз больше, во сколько площадь поршня d_2 больше площади поршня d_1 , поскольку $F_1 = \rho \pi d_1^2 / 4$ и $F_2 = \rho \pi d_2^2 / 4$.

Таким способом с помощью сравнительно небольших усилий между поршнем d_2 и плитой создаются значительные сжимающие нагрузки.

§ 4.4. Гидродинамика. Основные определения

Основным объектом изучения в гидродинамике является поток жидкости, т. е. движение массы жидкости между ограничивающими поверхностями. *Движущей силой потока* является разность давлений.

Различают два вида движения жидкости: установившееся и неустановившееся. *Установившимся* называют такое движение, при котором скорость жидкости в любой точке занятого ею пространства не изменяется с течением времени. При *неустановившемся* движении скорость жидкости изменяется по величине или направлению с течением времени.

Рассмотрим поток жидкости в трубе постоянного сечения. *Живым сечением потока* называется сечение в пределах потока, нормальное к направлению движения жидкости. Если поток занимает все сечение трубы, живое сечение потока совпадает с площадью поперечного сечения трубы. В разных точках поперечного сечения трубы скорость частиц жидкости неодинакова: она больше у оси трубы и уменьшается по мере приближения к стенкам вследствие трения.

Во многих практических случаях подсчет скоростей потока в различных точках сечения сложен, а иногда и невозможен. Поэтому в инженерных расчетах используют не истинные (локальные) скорости, а некоторую фиктивную *среднюю скорость v* , которая представляет собой отношение объемного расхода жидкости (V) к площади живого сечения потока (S)

$$v = V/S \quad (4.11)$$

или

$$V = vS. \quad (4.12)$$

Массовый расход жидкости

$$M = \rho vS, \quad (4.13)$$

где ρ — плотность жидкости.

Массовая скорость жидкости

$$W = \rho v. \quad (4.14)$$

Различают безнапорные (свободные) и напорные потоки. *Безнапорным* называют поток, имеющий свободную поверхность, например поток воды в канале, реке. *Напорный поток*, например поток воды в водопроводной трубе, не имеет свободной поверхности и занимает все живое сечение канала.

Каналы, по которым перемещается жидкость в производственных условиях, не всегда имеют круглое сечение. При движении жидкости по каналам любой формы в качестве линейного размера его принимают гидравлический радиус или эквивалентный диаметр.

Под *гидравлическим радиусом* R_r (м) понимают отношение площади живого сечения потока к смоченному периметру проводного канала

$$R_r = S/P, \quad (4.15)$$

где S — площадь живого сечения жидкости, m^2 ; P — смоченный периметр канала, м.

Если жидкость протекает по круглой трубе при полном ее заполнении, то $S = \pi d^2/4$ и $P = \pi d$, следовательно $R_r = (\pi d^2/4)/(\pi d) = d/4$.

Эквивалентный диаметр равен диаметру гипотетического (предположительного) трубопровода круглого сечения, для которого отношение площади A к смоченному периметру P то же, что и для данного трубопровода круглого сечения, т. е.

$$d_э = d = 4R_r = 4A/P. \quad (4.16)$$

Для канала прямоугольного сечения со сторонами a и b

$$R_r = ab/(2a + 2b) = ab/[2(a + b)],$$

$$d_э = 4R_r = 2ab/(a + b). \quad (4.17)$$

Для канала кольцевого сечения с диаметрами d_n и d_b

$$d_э = \frac{4(\pi d_n^2/2 - \pi d_b^2/2)}{\pi d_n + \pi d_b} = \frac{d_n^2 - d_b^2}{d_n + d_b} = d_n - d_b. \quad (4.18)$$

§ 4.5. Ламинарное и турбулентное движения жидкости

Экспериментально установлено, что в природе существуют два различных вида движения потока — *ламинарное* (слоистое, упорядоченное), при котором отдельные слои жидкости скользят друг относительно друга, и *турбулентное* (неупорядоченное), когда частицы жидкости движутся по сложным, все время изменяющимся траекториям.

В турбулентном потоке происходят пульсации скоростей, под действием которых частицы, движущиеся вдоль линии потока, получают поперечные перемещения, приводящие к интенсивному перемешиванию. Вследствие этого затрата энергии на турбулентное движение потока больше, чем на ламинарное. Интенсивность пульсаций служит мерой турбулентности потока. Пульсационные скорости, являющиеся отклонениями мгновенной скорости от среднего значения скорости потока, можно разложить на отдельные составляющие Δv_x , Δv_y и Δv_z , которые и характеризуют турбулентность потока.

Характерная картина изменения составляющей вдоль оси потока (оси x) мгновенной скорости v в зависимости от времени

представлена на рис. 4.6. Согласно рисунку, осредненная скорость потока

$$\bar{v} = v \pm \Delta v, \quad (4.19)$$

где v — истинная мгновенная скорость частицы в потоке по оси x ; Δv — отклонение мгновенной скорости.

Понятие осредненной скорости \bar{v} не следует путать с ранее данным понятием средней скорости. Осредненная скорость представляет собой не среднюю во времени скорость в данной точке, а среднюю скорость потока для всего поперечного сечения трубопровода. Если в отклонениях мгновенных скоростей имеется одинаковое число положительных и отрицательных значений (т. е. $\Sigma \Delta v_x = 0$, $\Sigma \Delta v_y = 0$ и $\Sigma \Delta v_z = 0$), то говорят, что турбулентность потока изотропна. При анизотропной турбулентности пульсационные скорости различны во всех направлениях.

Турбулентность можно характеризовать так называемым турбулентным расстоянием, представляющим собой максимальное расстояние между точками, движущимися в турбулентном потоке с одинаковой скоростью. Турбулентное расстояние постоянно изменяется во всем объеме жидкости и служит масштабом турбулентности. Максимальное значение оно будет иметь в центре потока, где скорость наибольшая.

Весьма важной характеристикой турбулентного движения является турбулентная вязкость. Рассмотрим две частицы жидкости, двигающиеся в турбулентном потоке со скоростями \bar{v}_x и \bar{v}_x , отличающимися на $d\bar{v}_x$ и находящимися на расстоянии dy . Тогда на основании уравнений (4.5) и (4.6) можно написать:

$$\tau_{\text{т}} = -\eta d(\bar{v}_x/dy) = -\nu_{\text{т}}(d\bar{v}_x/dy).$$

Для ламинарного потока это касательное напряжение было бы единственным и полностью определяло бы вязкость жидкости.

В турбулентном потоке помимо движения по оси x данные частицы двигаются и в поперечном направлении, что вызывает возникновение касательных напряжений $\tau_{\text{т}}$ (индекс «т» — турбулентное в отличие от «н» — ньютоновское).

$$\tau_{\text{т}} = -\eta_{\text{т}}(d\bar{v}_x/dy) = -\nu_{\text{т}}(d\bar{v}_x/dy).$$

Величину $\nu_{\text{т}}$ называют *турбулентной вязкостью*, которая в отличие от обычной вязкости не является свойством самой жидкости, а зависит от параметров потока — скорости жидкости, расстояния от стенки трубы и др.

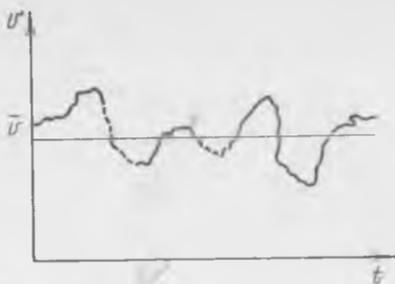


Рис. 4.6. Изменение истинной мгновенной скорости потока во времени

Суммарное касательное напряжение в потоке определяется как вязкостью жидкости, так и турбулентностью потока

$$\tau = \tau_n + \tau_t = -(\eta_n + \eta_t) d\bar{v}_x/dy. \quad (4.20)$$

Турбулентная вязкость изменяется пропорционально градиенту скорости от нуля у стенок трубы (стенки как бы «гасят» поперечное перемещение частиц в потоке) до относительно больших величин в центре потока. При большой турбулентности значением η_n можно пренебречь.

Основываясь на результатах опытов, Рейнольдс установил, что режим движения жидкости зависит от скорости потока, плотности и вязкости жидкости, диаметра трубы. Эти величины входят в безразмерный комплекс — критерий Рейнольдса $Re = vdr/\eta$.

Переход от ламинарного режима движения к турбулентному происходит при критическом значении критерия $Re_{кр}$. Значение $Re_{кр}$ характерно для каждой группы процессов. Например, ламинарный режим при движении потока в прямой трубе наблюдается при $Re \leq 2300$. Развитый турбулентный режим наступает при $Re > 10^4$. Для движения жидкости в змеевиках $Re_{кр} = f(d/D)$, для перемешивания $Re_{кр} \approx 50$, осаждения — 0,2 и т. д.

§ 4.6. Распределение скоростей и расход жидкости в потоке

Движущийся поток жидкости в прямой трубе круглого сечения разобьем на ряд кольцевых слоев, соосных с трубой (рис. 4.7). Пусть разность давлений, являющаяся движущей силой, такова, что скорость слоя, непосредственно прилегающего к стенке, равна нулю вследствие наличия силы трения по величине большей, чем движущая сила. Последующие слои будут двигаться с разными скоростями, так как между ними имеются силы трения. Максимальную скорость будет иметь центральный цилиндрический слой. Выделим в ламинарном потоке жидкости, движущейся по трубе радиусом R , цилиндрический слой радиусом r и длиной l . Движущая сила равна разности сил давлений P_1 и P_2 , которая определяется площадью живого сечения потока и гидростатическим давлением p_1 и p_2 в сечениях 1—1 и 2—2.

$$P_1 - P_2 = (p_1 - p_2) \pi r^2.$$

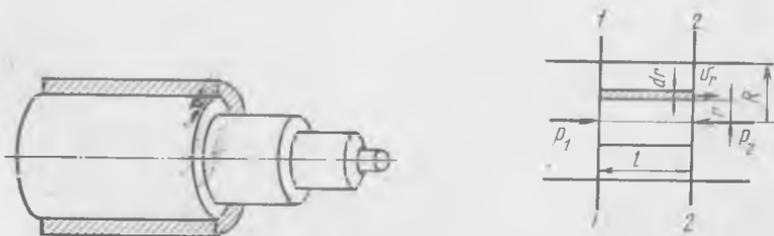


Рис. 4.7. К определению расхода жидкости в ламинарном потоке

Движению цилиндра оказывает сопротивление сила трения, которая согласно (4.4) равна

$$F = -\eta A(dv_r/dr),$$

где v_r — скорость движения цилиндра; r — расстояние от оси до образующей цилиндра; $A = 2\pi r l$ — наружная поверхность цилиндра; η — вязкость жидкости.

При установившемся движении

$$(p_1 - p_2) \pi r^2 = -\eta 2\pi r l (dv_r/dr).$$

После преобразования и деления переменных получим

$$\frac{p_1 - p_2}{2\eta l} r dr = - \int_{v_r}^0 dv_r.$$

Интегрируя это выражение для всего объема жидкости при изменении r до R и v_r до 0, получим

$$\int_r^R \frac{p_1 - p_2}{2\eta l} r dr = - \int_{v_r}^0 dv_r.$$

Решая, получим

$$\frac{p_1 - p_2}{2\eta l} \left(\frac{R^2}{2} - \frac{r^2}{2} \right) = v_r \quad \text{или} \quad v_r = \frac{p_1 - p_2}{4\eta l} (R^2 - r^2). \quad (4.21)$$

Очевидно, что максимальное значение скорости будет при $r = 0$

$$v_{\max} = (p_1 - p_2) R^2 / (4\eta l). \quad (4.22)$$

Разделив (4.21) на (4.22), получим

$$v_r / v_{\max} = (R^2 - r^2) / R^2 = 1 - r^2 / R^2, \quad (4.23)$$

откуда

$$v_r = v_{\max} (1 - r^2 / R^2).$$

Следовательно, при ламинарном движении распределение скоростей в трубе параболическое. Уравнение (4.23) представляет собой закон Стокса. Площадь кольцевого сечения dA (см. рис. 4.7) с внутренним радиусом r и внешним $r + dr$ равна $2\pi r dr$. Тогда объемный расход жидкости через это сечение составит

$$dV = v_r dA = v_r \cdot 2\pi r dr. \quad (4.24)$$

Подставляя значения v_r из уравнения (4.21), получим

$$dV = \frac{p_1 - p_2}{4\eta l} (R^2 - r^2) 2\pi r dr.$$

Общий расход жидкости через все сечение получим интегрированием последнего выражения

$$\int dV = \int_0^R \frac{p_1 - p_2}{4\eta l} (R^2 - r^2) 2\pi r dr \text{ или}$$

$$V = \frac{p_1 - p_2}{4\eta l} 2\pi \left(\int_0^R R^2 r dr - \int_0^R r^3 dr \right) = \frac{p_1 - p_2}{8\eta l} \pi R^4. \quad (4.25)$$

Обозначая $(p_1 - p_2) = \Delta p$ и $d = 2R$, получим уравнение Пуазейля для расхода жидкости при ламинарном движении по круглой трубе

$$V = \pi d^4 \Delta p / (128 \eta l). \quad (4.26)$$

Сравнивая формулы (4.12) и (4.25), можно получить выражение для средней скорости потока

$$V = vA = v\pi R^2 \text{ и } V = \frac{p_1 - p_2}{8\eta l} \pi R^4,$$

тогда

$$v = \left(\frac{p_1 - p_2}{8\eta l} \pi R^4 \right) / (\pi R^2) = \frac{p_1 - p_2}{8\eta l} R^2. \quad (4.27)$$

Разделив (4.21) на (4.22), получим

$$v/v_{\max} = \left(\frac{p_1 - p_2}{8\eta l} R^2 \right) / \left(\frac{p_1 - p_2}{4\eta l} R^2 \right),$$

откуда

$$v = v_{\max}/2 \quad (4.28)$$

или, подставляя в выражение (4.25) значение v из (4.28), получим

$$v_r = 2v(1 - r^2/R^2). \quad (4.29)$$

Таким образом, при ламинарном движении жидкости в прямой круглой трубе средняя скорость жидкости равна половине скорости по оси трубы.

Рассматривая эпюры скоростей потоков при ламинарном и турбулентном движении (рис. 4.8), можно отметить их различный характер. При турбулентном потоке из-за хаотического движения частиц происходит выравнивание скоростей: кривая эпюры скоростей имеет более широкую вершину, чем при ламинарном потоке. Опыт показывает, что средняя скорость турбулентного потока значительно больше половины максимальной, причем их отношение $v/v_{\max} = f(Re)$. Например, при $Re = 10^4$ средняя скорость $v \approx 0,8 v_{\max}$, а при $Re = 10^8$ $v \approx 0,8 v_{\max}$. В турбулентном потоке условно раз-



Рис. 4.8. Распределение скоростей при ламинарном а и турбулентном б режимах (v — ядро потока)

личают центральную зону с развитым турбулентным движением, называемую *ядром потока*, и пограничный слой, где происходит переход от турбулентного движения к ламинарному.

У самой стенки трубы, где силы вязкости оказывают превалирующее влияние на характер движения жидкости, режим потока в основном становится ламинарным. Ламинарный подслой в турбулентном потоке имеет очень малую толщину, которая уменьшается с возрастанием турбулентности. Однако явления, происходящие в нем, оказывают значительное влияние на величину сопротивления при движении жидкости, на протекание процессов тепло- и массообмена.

§ 4.7. Уравнение неразрывности потока

Для вывода уравнения неразрывности (сплошности потока) выделим внутри потока элементарный параллелепипед $dV = dx dy dz$ с ребрами, параллельными осям координат (рис. 4.9). Если составляющая скорости потока вдоль оси x на грани $ABCD$ равна v_x , то согласно уравнению $M = \rho v S$ массовый расход жидкости, проходящей через эту грань, равен $\rho v_x dy dz$, а за время dt

$$M_x = \rho v_x dy dz dt.$$

На грани $A'B'C'D'$ скорость и плотность жидкости могут отличаться от соответствующих величин на $(\partial v_x / \partial x) dx$ и $(\partial \rho / \partial x) dx$. Следовательно, через эту грань за время dt массовый расход жидкости составит

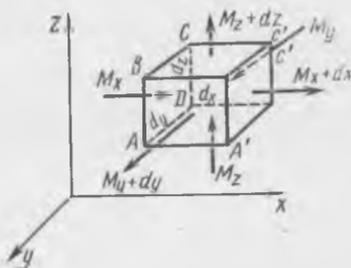


Рис. 4.9. К выводу дифференциального уравнения неразрывности потока

$$M_{x+dx} = \left[\rho v_x + \frac{\partial (\rho v_x)}{\partial x} dx \right] dy dz dt,$$

а приращение массового расхода

$$dM_x = M_x - M_{x+dx} = - \frac{\partial (\rho v_x)}{\partial x} dx dy dz dt. \quad (4.30)$$

Если составляющие скоростей по осям y и z равны v_y и v_z , то по аналогии с (4.30) приращение массовых расходов по этим осям составит

$$dM_y = - \frac{\partial (\rho v_y)}{\partial y} dx dy dz dt; \quad (4.31)$$

$$dM_z = - \frac{\partial (\rho v_z)}{\partial z} dx dy dz dt. \quad (4.32)$$

Общее приращение массового расхода жидкости в параллелепипеде за время dt равно сумме приращений по осям

$$dM = -[\partial(\rho v_x)/\partial x + \partial(\rho v_y)/\partial y + \partial(\rho v_z)/\partial z] dx dy dz dt. \quad (4.33)$$

Изменение массового расхода по входу и выходу жидкости из параллелепипеда возможно только за счет уплотнения жидкости, т. е. изменения плотности за время dt

$$dM = \frac{\partial \rho}{\partial t} dx dy dz dt. \quad (4.34)$$

Решая совместно (4.33) и (4.34), получим

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0. \quad (4.35)$$

Уравнение (4.35) является дифференциальным уравнением неразрывности потока для неустановившегося движения сжимаемой жидкости.

В установившемся потоке плотность не изменяется во времени ($\partial \rho / \partial t = 0$) и уравнение (4.35) примет вид

$$\partial(\rho v_x)/\partial x + \partial(\rho v_y)/\partial y + \partial(\rho v_z)/\partial z = 0. \quad (4.36)$$

Для капельных жидкостей, которые практически несжимаемы, а также для газов при изотермическом процессе $\rho = \text{const}$, следовательно,

$$\partial v_x / \partial x + \partial v_y / \partial y + \partial v_z / \partial z = 0. \quad (4.37)$$

Уравнение (4.37) является дифференциальным уравнением неразрывности установившегося потока несжимаемой жидкости. Левая часть этого уравнения, представляющая сумму изменений скорости по осям координат, называется *дивергенцией вектора скорости* ($\text{div } v$), тогда

$$\text{div } v = 0. \quad (4.38)$$

Интегрируя выражение (4.36), получим уравнение неразрывности потока в интегральной форме.

Если бы площадь сечения трубопровода оставалась постоянной, то для установившегося движения по оси x интегрирование (4.36) дало

$$\rho v = \text{const},$$

где v — средняя скорость жидкости.

При переменной площади сечения интегрирование дает

$$\rho v S = \text{const}.$$

Для сечений 1...3 (рис. 4.10) можно написать

$$\rho_1 v_1 S_1 = \rho_2 v_2 S_2 = \rho_3 v_3 S_3 \quad (4.39)$$

или $M_1 = M_2 = M_3$.

Для капельной жидкости $\rho = \text{const}$, следовательно,

$$v_1 S_1 = v_2 S_2 = v_3 S_3 \quad (4.40)$$

и
$$V_1 = V_2 = V_3. \quad (4.41)$$

Выражения (4.40) и (4.41) являются уравнением неразрывности для установившегося потока в интегральной форме.

Таким образом, при установившемся движении через каждое поперечное сечение трубопровода при его полном заполнении в единицу времени проходит одно и то же количество жидкости. Уравнения (4.39)...(4.41) являются частным случаем закона сохранения массы и выражают материальный баланс потока.

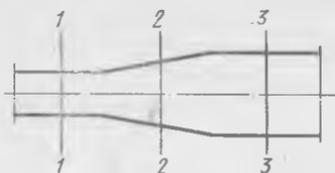


Рис. 4.10. К выводу уравнения постоянства расхода

§ 4.8. Дифференциальные уравнения Эйлера и Навье — Стокса

Согласно основному принципу динамики, сумма проекций сил, действующих на движущийся объем жидкости, равна произведению массы жидкости в объеме элементарного параллелепипеда (см. рис. 4.3) $dm = \rho dx dy dz$.

При движении жидкости со скоростью v ее ускорение dv/dt , а проекции ускорения на оси координат dv_x/dt ; dv_y/dt ; dv_z/dt . На элементарный параллелепипед объемом $dV = dx dy dz$ действуют силы тяжести и давления. Проекции этих сил на оси координат (см. § 4.2) составляют

$$-\frac{\partial p}{\partial x} dx dy dz; \quad -\frac{\partial p}{\partial y} dx dy dz; \quad -\left(\rho g + \frac{\partial p}{\partial z}\right) dx dy dz.$$

В соответствии с основным принципом динамики, согласно второму закону Ньютона ($F = ma$),

$$\left. \begin{aligned} \rho dx dy dz \frac{dv_x}{dt} &= -\frac{\partial p}{\partial x} dx dy dz; \\ \rho dx dy dz \frac{dv_y}{dt} &= -\frac{\partial p}{\partial y} dx dy dz; \\ \rho dx dy dz \frac{dv_z}{dt} &= -\left(\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g\right) dx dy dz. \end{aligned} \right\}$$

Сокращая на $dx dy dz$, получим

$$\left. \begin{aligned} \rho dv_x/dt &= -\partial p/\partial x; \\ \rho dv_y/dt &= -\partial p/\partial y; \\ \rho dv_z/dt &= -\rho g - \partial p/\partial z. \end{aligned} \right\} \quad (4.42)$$

Система уравнений (4.42) представляет собой дифференциальные уравнения движения идеальной жидкости Эйлера.

При движении реальной жидкости в потоке помимо сил давления и тяжести действуют силы трения, поэтому уравнения (4.42) должны быть дополнены составляющими проекций сил трения на соответствующие оси.

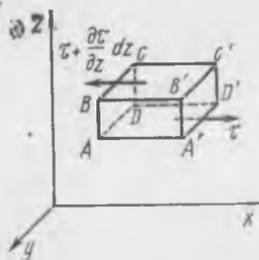


Рис. 4.11. К выводу уравнения Навье — Стокса

При движении элементарного объема капельной жидкости (рис. 4.11) проекция скорости v_x зависит от расстояния до горизонтальной плоскости отсчета. Касательные напряжения возникают на поверхностях dA граней параллелепипеда. На горизонтальных гранях $dA = dx dy$, причем на грани $ADD'A'$ касательное напряжение равно τ , а на грани $BCC'B'$ оно равно $\tau + (\partial\tau/\partial z) dz$, где $\partial\tau/\partial z$ выражает изменение касательного напряжения вдоль оси z , а $(\partial\tau/\partial z) dz$ — изменение этого напряжения вдоль всей длины ребра dz .

Тогда проекция равнодействующей сил трения на ось x равна

$$\tau dx dy - \left(\tau + \frac{\partial\tau}{\partial z} dz \right) dx dy = - \frac{\partial\tau}{\partial z} dx dy dz.$$

Подставляя вместо τ его значения, получим

$$\eta \frac{\partial \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} \right)}{\partial z} dx dy dz = \eta \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} dx dy dz.$$

Рассуждая аналогично для осей y и z , можно написать, что проекция равнодействующей сил трения на ось x имеет такой вид:

$$\eta (\partial^2 v_x / \partial x^2 + \partial^2 v_x / \partial y^2 + \partial^2 v_x / \partial z^2) dx dy dz.$$

Сумму в скобках называют оператором Лапласа и обозначают через $\nabla^2 v_x$.

Таким образом, проекцию равнодействующей сил трения на ось x можно записать $\eta \nabla^2 v_x dx dy dz$.

Аналогично, проекции равнодействующей сил трения по осям y и z будут равны $\eta \nabla^2 v_y dx dy dz$ и $\eta \nabla^2 v_z dx dy dz$.

Согласно второму закону Ньютона, проекции всех сил — тяжести, давления (полученных при выводе уравнений Эйлера) и трения — должны быть равны произведению массы жидкости на проекции ускорения на оси координат, т. е.

$$\rho dx dy dz \frac{dv_x}{dt} = - \frac{\partial p}{\partial x} dx dy dz + \eta \nabla^2 v_x dx dy dz;$$

$$\rho dx dy dz \frac{dv_y}{dt} = - \frac{\partial p}{\partial y} dx dy dz + \eta \nabla^2 v_y dx dy dz;$$

$$\rho dx dy dz \frac{dv_z}{dt} = - \left(\rho g + \frac{\partial p}{\partial z} \right) dx dy dz + \eta \nabla^2 v_z dx dy dz.$$

Сокращая на $dx dy dz$, получим дифференциальные уравнения движения Навье — Стокса для вязкой капельной жидкости

$$\left. \begin{aligned} \rho \frac{dv_x}{dt} &= - \frac{\partial p}{\partial x} + \eta \nabla^2 v_x; \\ \rho \frac{dv_y}{dt} &= - \frac{\partial p}{\partial y} + \eta \nabla^2 v_y; \\ \rho \frac{dv_z}{dt} &= - \rho g - \frac{\partial p}{\partial z} + \eta \nabla^2 v_z. \end{aligned} \right\} (4.43)$$

Таким образом, уравнения (4.42) представляют собой частный случай уравнений Навье — Стокса. При отсутствии сил трения (т. е. в идеальной жидкости) при $\eta=0$ уравнения (4.43) превращаются в дифференциальные уравнения движения Эйлера.

Уравнения Навье — Стокса не могут быть решены в общем виде. Получены решения лишь для некоторых частных случаев одномерного или двумерного потока, например для течения вязкой жидкости по прямой трубе (задача Пуазейля), для течения между двумя плоскими параллельными стенками, при обтекании неподвижной тонкой пластинки. В большинстве же наиболее важных для промышленной практики случаев применение этих уравнений возможно либо при ряде упрощающих допущений, либо при преобразовании их в критериальные формы.

В качестве примера рассмотрим дифференциальное уравнение движения установившегося одномерного потока несжимаемой вязкой жидкости, обладающей силой инерции и находящейся под действием сил тяжести, давления и трения:

$$\rho (dv_z/dt) = - \rho g - \partial p / \partial z + \eta \nabla^2 v_z.$$

В подобных преобразованиях отношения приращений можно заменить отношениями их значений. Следовательно, можно записать, что

$$\rho (dv/dt) \approx \rho v/t = \rho v^2/l; \quad (4.44)$$

$$\partial p / \partial z \approx p/l; \quad (4.45)$$

$$\eta \nabla^2 = \eta (\partial^2 v_x / \partial x^2 + \partial^2 v_y / \partial y^2 + \partial^2 v_z / \partial z^2) \approx \eta v/l^2. \quad (4.46)$$

Если в качестве масштаба сравнения выбрать силу инерции ($\rho v^2/l$), то отношение сил тяжести к силе инерции запишется

$$\frac{\rho g}{\rho v^2/l} = gl/v^2.$$

Обратное значение безразмерного комплекса gl/v^2 представляет собой критерий Фруда

$$Fr = v^2/(gl). \quad (4.47)$$

Отношение сил давления к силам инерции дает *критерий Эйлера* (если вместо абсолютного давления p ввести разность давлений Δp между двумя точками жидкости)

$$\frac{\Delta p/l}{\rho v^2/l} = \frac{\Delta p}{\rho v^2} = \text{Eu}. \quad (4.48)$$

Отношение силы инерции $\rho v^2/l$ к силе трения дает *критерий Рейнольдса*

$$\frac{\rho v^2/l}{\eta v/l^2} = \frac{v l \rho}{\eta} = \text{Re}. \quad (4.49)$$

Критерий гомохронности характеризует влияние нестационарности движения на скорость потока и имеет вид

$$\frac{\rho v^2/l}{\rho v/t} = \frac{v t}{l} = \text{Ho}. \quad (4.50)$$

Произведение критерия Эйлера на критерий Рейнольдса дает *критерий Лагранжа*

$$\text{La} = \text{Eu Re} = \frac{\Delta p}{\rho v^2} \frac{v l \rho}{\eta} = \frac{\Delta p l}{\eta v}. \quad (4.51)$$

При сравнении подобных систем движущейся жидкости критерии (4.47)...(4.50) должны сохранять одно и то же значение во всех сходственных точках, т. е.

$$\left. \begin{aligned} \text{Fr} &= \text{idem}; \\ \text{Eu} &= \text{idem}; \\ \text{Re} &= \text{idem}; \\ \text{Ho} &= \text{idem}. \end{aligned} \right\} \quad (4.52)$$

Таким образом, вместо дифференциального уравнения движения жидкости можно записать критериальное

$$f(\text{Fr}, \text{Eu}, \text{Re}, \text{Ho}) = 0. \quad (4.53)$$

Уравнение (4.53) отражает физическое и временное подобие. Для полного подобия его необходимо дополнить геометрическим подобием, которое, например, при движении жидкости по каналам и трубам будет выражаться *геометрическим симплексом* $l/d = \Gamma$. Следовательно, при полном подобии общая критериальная зависимость будет иметь вид

$$\varphi(\text{Fr}, \text{Eu}, \text{Re}, \text{Ho}, \Gamma) = 0. \quad (4.54)$$

§ 4.9. Уравнение Бернулли

Для вывода уравнения Бернулли умножим обе части уравнений Эйлера (4.42) соответственно на dx , dy , dz и разделим на ρ

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{dt} dv_x &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} dx; \\ \frac{dy}{dt} dv_y &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} dy; \\ \frac{dz}{dt} dv_z &= -gdz - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} dz. \end{aligned} \right\}$$

При сложении этих уравнений получим

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} dv_x + \frac{dy}{dt} dv_y + \frac{dz}{dt} dv_z &= -gdz - \\ &- \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial x} dx + \frac{\partial p}{\partial y} dy + \frac{\partial p}{\partial z} dz \right). \end{aligned}$$

Отношения dx/dt , dy/dt и dz/dt при установившемся движении представляют собой проекции скорости на соответствующие оси координат и, следовательно,

$$v_x dv_x + v_y dv_y + v_z dv_z = -gdz - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial x} dx + \frac{\partial p}{\partial y} dy + \frac{\partial p}{\partial z} dz \right).$$

Введя v_x , v_y и v_z под знак дифференциала, получим значение левой части уравнения

$$\begin{aligned} v_x dv_x + v_y dv_y + v_z dv_z &= d(v_x^2/2) + d(v_y^2/2) + d(v_z^2/2) = \\ &= d[(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)/2] = d(v^2/2), \end{aligned}$$

где v — величина вектора скорости, составляющие которого по осям равны v_x , v_y , v_z .

Сумма $\frac{\partial p}{\partial x} dx + \frac{\partial p}{\partial y} dy + \frac{\partial p}{\partial z} dz$ является полным дифференциалом давления dp , следовательно, можно записать $d(v^2/2) = -dp/\rho - gdz$. Разделив на g , получим $d[v^2/(2g)] + dp/(\rho g) + dz = 0$, откуда

$$v^2/(2g) + p/(\rho g) + z = \text{const.} \quad (4.55)$$

Выражение (4.55) является уравнением Бернулли для идеальной жидкости. Для любых двух сходственных точек потока можно написать

$$z_1 + p_1/(\rho g) + v_1^2/(2g) = z_2 + p_2/(\rho g) + v_2^2/(2g). \quad (4.56)$$

Величина $[z + p/(\rho g) + v^2/(2g)]$ называется полным гидродинамическим напором, где z — *геометрический напор* (H_r), представляющий удельную потенциальную энергию положения в данной точке; $p/(\rho g)$ — *статический напор* ($H_{ст}$), характеризующий удель-

ную потенциальную энергию давления в данной точке; $v^2/(2g)$ — динамический напор ($H_{\text{дин}}$), представляющий удельную кинетическую энергию в данной точке.

Из сказанного следует, что при установившемся движении идеальной жидкости сумма потенциальной и кинетической энергии жидкости для каждого из поперечных сечений потока остается неизменной. Таким образом, уравнение Бернулли является частным случаем закона сохранения энергии.

При движении реальных жидкостей вследствие вязкости жидкости и сил трения о стенки трубы возникают силы, оказывающие сопротивление движению жидкости и, следовательно, $z_1 + p_1/(\rho g) + v_1^2/(2g) > z_2 + p_2/(\rho g) + v_2^2/(2g)$.

На преодоление возникающего гидравлического сопротивления будет расходоваться часть энергии потока, носящей название *потерянного напора* $H_{\text{пот}}$.

Для сохранения баланса энергии при движении реальных жидкостей в уравнение (4.56) должен быть введен дополнительный член, характеризующий эту потерянную энергию. Тогда уравнение Бернулли для реальных жидкостей примет вид

$$z_1 + p_1/(\rho g) + v_1^2/(2g) = z_2 + p_2/(\rho g) + v_2^2/(2g) + H_{\text{пот}}. \quad (4.57)$$

§ 4.10. Гидравлические сопротивления в трубопроводах

Рассмотрим участок трубы, заполненный жидкостью (рис. 4.12). Если жидкость находится в состоянии покоя, то ее взаимодействие со стенками трубы определяется силой, направленной вертикально вниз (вес жидкости).

При движении жидкости между стенками и потоком возникают силы сопротивления, обусловленные торможением крайних слоев о стенки (силы трения). Благодаря вязкости жидкости это торможение передается последующим слоям. Равнодействующая сила сопротивления F направлена в сторону, противоположную движению. Для преодоления сопротивления трения и поддержания поступательного движения потока необходимо затратить дополнительную энергию. Энергию или напор, необходимые для преодоления сил

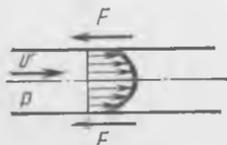


Рис. 4.12. К понятию о потерях напора на трение

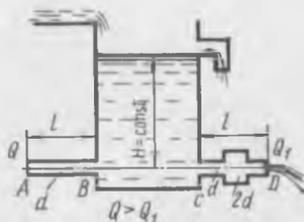


Рис. 4.13. К понятию о местных сопротивлениях

трения, называют *потерями напора на трение* или *линейными потерями напора* $H_{\text{тр}}$.

Согласно (4.57),

$$H_{\text{пот}} = (z_1 - z_2) + [p_1/(\rho g) + p_2/(\rho g)] + [v_1^2/(2g) + v_2^2/(2g)].$$

На горизонтальном участке трубы ($z_1 = z_2$) постоянного диаметра при равномерном движении потока ($v_1 = v_2$) потери напора

$$H_{\text{пот}} = \Delta p/(\rho g) = H_{\text{тр}}. \quad (4.58)$$

Как показывают опыты, потери напора, возникающие при движении жидкости, зависят не только от трения о стенки. Пусть бак (рис. 4.13) наполнен водой, уровень которой постоянно поддерживается. Бак питает жидкостью трубу AB длиной l постоянного сечения d . Расход жидкости равен Q . Если трубу AB заменить трубой CD такой же длины, но имеющей переменное сечение от d до $2d$, то расход жидкости Q_1 изменится, причем $Q_1 < Q$. Следовательно, трение является не единственной причиной появления потери напора; резкие изменения сечения также оказывают сопротивление движению и приводят к потере напора. Существуют и другие причины, вызывающие потери напора, например внезапное изменение направления движения потока.

Потери напора, возникающие в результате резкого изменения конфигурации границ потока, называют местными потерями $H_{\text{м.с}}$ или потерями напора на местные сопротивления. Таким образом, общие потери напора при движении жидкости складываются из потерь напора на трение и потерь на местные сопротивления, т. е.

$$H_{\text{пот}} = H_{\text{тр}} + H_{\text{м.с}}. \quad (4.59)$$

Используем метод анализа размерностей для определения потерь напора на трение, возникающих при равномерном движении потока в трубах. Как известно, метод анализа размерностей позволяет выразить общую функциональную зависимость для любого исследуемого процесса в виде уравнений связи между строго определенным числом безразмерных комплексов, состоящих из физических величин с определенной размерностью, выраженной через основные единицы измерения. При этом должно быть известно, от каких параметров процесса и переменных зависят рассматриваемая физическая величина и характер связи (в виде степенного многочлена) между всеми существенными для процесса физическими величинами.

Опыты показывают, что потери напора на трение зависят от диаметра d и длины трубы l , физических свойств жидкости — вязкости η и плотности ρ , средней скорости движения жидкости v , шероховатости $n_{\text{ш}}$ стенок трубы. Тогда интересующую нас функциональную зависимость можно представить в виде

$$\Delta p_{\text{тр}} = f(a, l, \eta, \rho, v, n_{\text{ш}}), \quad (4.60)$$

где $\Delta p_{\text{тр}}$ — потери напора на трение, согласно (4.58) равные $H_{\text{тр}}\rho g$.

Поскольку потери на трение пропорциональны длине участка, перепишем (4.60) в виде

$$f'(\Delta p_{\text{тр}}/l; d, \eta, \rho, v, n_{\text{ш}}) = 0. \quad (4.61)$$

Вид функций f и f' неизвестен. Для измерения входящих в (4.61) шести величин требуются три основные единицы: масса, время, длина. Тогда по π -теореме (см. гл. 1), согласно которой всякое уравнение, связывающее N физических величин, выраженных через n основных единиц, может быть преобразовано в уравнение, связывающее π безразмерных критериев подобия, причем $\pi = N - n$, выражение (4.61) можно записать в виде

$$f_2(K_1; K_2; K_3) = 0. \quad (4.62)$$

Для определения безразмерных комплексов K_1 , K_2 и K_3 выберем из всех переменных выражения (4.62) три, включающие основные единицы измерения, например v , d и ρ .

Уравнения размерностей, объединяющие выбранные переменные с каждой из других переменных по очереди, имеют такой вид:

$$K_1 = d^{x_1} v^{y_1} \rho^{z_1} n_{\text{ш}}; \quad (4.63)$$

$$K_2 = d^{x_2} v^{y_2} \rho^{z_2} \eta; \quad (4.64)$$

$$K_3 = d^{x_3} v^{y_3} \rho^{z_3} \Delta p_{\text{тр}}/L. \quad (4.65)$$

Условие однородности размерностей для K_1 :

$$L^{x_1} (LT^{-1})^{y_1} (ML^{-3})^{z_1} L = L^0 T^0 M^0. \quad (4.66)$$

Показатели степеней при одинаковых основных единицах в обеих частях уравнения должны быть равны, поэтому

$$\left. \begin{array}{l} \text{по } L \quad x_1 + y_1 - 3z_1 + 1 = 0; \\ \text{по } T \quad \quad \quad -y = 0; \\ \text{по } M \quad \quad \quad \quad \quad z = 0, \end{array} \right\} \quad (4.67)$$

откуда $x = -1$.

Подставляя значения x , y , z из (4.67) в (4.65), получим $K_1 = d^{-1} v^0 \rho^0 n_{\text{ш}}$, откуда

$$K_1 = n_{\text{ш}}/d. \quad (4.68)$$

Аналогичным образом нетрудно показать, что

$$K_2 = v d \rho / \eta; \quad (4.69)$$

$$K_3 = (d \Delta p_{\text{тр}} / l) / (v^2 \rho). \quad (4.70)$$

Подставляя (4.68)...(4.70) в (4.62), получим $f_2[n_{\text{ш}}/d; v d \rho / \eta; (\Delta p_{\text{тр}} d / l) / (v^2 \rho)] = 0$.

Решая относительно $\Delta p_{\text{тр}}$, можно записать

$$\Delta p_{\text{тр}} = \frac{l v^2 \rho}{d} \varphi(v d \rho / \eta; n_{\text{ш}} / d). \quad (4.71)$$

Подставив в (4.58) значения $\Delta p_{\text{тр}}$, получим

$$H_{\text{тр}} = \frac{v^2 l}{gd} \varphi(vd\rho/\eta; n_{\text{ш}}/d). \quad (4.72)$$

Обозначив $\varphi(vd\rho/\eta; n_{\text{ш}}/d) = \lambda/2$, получим

$$H_{\text{тр}} = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}. \quad (4.73)$$

Из (4.73) следует, что потери напора на трение прямо пропорциональны длине трубы и скорости потока и обратно пропорциональны диаметру трубы. Формула (4.73) экспериментально была получена в XIX в. и носит название формулы Дарси — Вейсбаха. В приведенной формуле λ называют коэффициентом гидравлического трения.

Значения коэффициента гидравлического трения можно получить из формулы Пуазейля. Зная, что $V = vS = v\pi d^2/4$ и $\Delta p = \rho g H_{\text{тр}}$, формулу Пуазейля можно записать $v\pi d^2/4 = \pi d^4 \rho g T_{\text{тр}}/128$. Умножив числитель и знаменатель левой части на $2v$ и решая относительно $H_{\text{тр}}$, получим

$$H_{\text{тр}} = \frac{2v^2 \pi d^2 \cdot 128 \eta l}{4v \pi d^4 \rho g} = \frac{64 \eta}{\rho v d} \frac{v^2}{2g} \frac{l}{d}. \quad (4.73')$$

Решая совместно (4.73) и (4.73'), получим

$$\lambda_{\text{лам}} \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} = \frac{64 \eta}{\rho v d} \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g},$$

учитывая, что $64\eta/(\rho v d) = 64/\text{Re}$, имеем

$$\lambda_{\text{лам}} = 64/\text{Re}. \quad (4.74)$$

Поскольку уравнение Пуазейля справедливо для ламинарного движения, значения коэффициента λ по формуле (4.74) также справедливы только для ламинарного течения жидкости.

Вследствие невозможности решения в общем виде уравнений движения Навье — Стокса теоретическое определение коэффициента трения для турбулентного потока не представляется возможным. Его получают обобщением результатов экспериментов методом подобия.

При полном подобии уравнение движения жидкости в критериальной форме имеет вид $f(\text{Fr}, \text{Eu}, \text{Re}, \text{No}, \Gamma) = 0$, или $\text{Eu} = \varphi(\text{Fr}, \text{Re}, \text{No}, \Gamma)$.

При установившемся движении критерий гомотронности может быть исключен из уравнения, поскольку он характеризует влияние нестационарности движения на скорость потока.

При вынужденном турбулентном движении капельных жидкостей влияние собственной массы жидкости на распределение скоростей и перепад давлений очень мало. Поэтому критерием Фруда, отражающим влияние силы тяжести, можно пренебречь. Тогда

для установившегося турбулентного движения критериальное уравнение можно записать в виде

$$Eu = \varphi'(Re, \Gamma)$$

или, принимая степенную зависимость,

$$Eu = A Re^m \Gamma^q. \quad (4.75)$$

Обобщением опытных данных при $Re = 4 \cdot 10^3 \dots 1 \cdot 10^5$ найдены числовые значения: $A = 0,158$; $m = -0,25$; $q = 1$.

Подставляя в (4.75) значения Eu , Γ , A , m и q при $\Delta p = \rho g H_{тр}$, получим

$$\begin{aligned} \rho g H_{тр} / (\rho v^2) &= 0,158 Re^{-0,25} (l/d) \text{ или } = \\ &= H_{тр} = 0,316 Re^{-0,25} (l/d) (v^2/2). \end{aligned} \quad (4.76)$$

Сравнивая (4.76) с (4.73), можно написать, что для турбулентного движения потока в гладких трубах при $Re = 4 \cdot 10^3 \dots 1 \cdot 10^5$ коэффициент трения выражается обобщенной зависимостью

$$\lambda_{тур} = 0,316 / \sqrt[4]{Re}. \quad (4.77)$$

При турбулентном потоке коэффициент трения в общем случае зависит не только от характера движения жидкости, но и от шероховатости стенок труб.

Из рис. (4.14) видно, что вблизи значений $Re_{кр}$ режим движения является неустойчивым и λ достаточно точно определить нельзя, а для шероховатых труб значение λ выше, чем подсчитан-

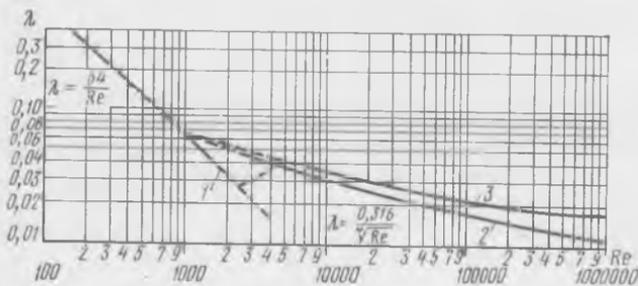


Рис. 4.14. Зависимость λ от критерия Re :

1 — гладкие и шероховатые трубы; 2 — гладкие трубы; 3 — шероховатые трубы

ные по формуле (4.77). Шероховатость количественно оценивается величиной абсолютной шероховатости Δ , являющейся средней высотой выступов на внутренней поверхности труб. Влияние шероховатости на коэффициент трения λ определяется отношением между Δ и толщиной ламинарного подслоя δ . В начальной области турбулентного движения, когда $\delta > \Delta$, жидкость плавно обтекает выступы и их влияние на λ можно не учитывать.

В этом случае трубы можно рассматривать как гидравлически гладкие и $\lambda_{\text{тур}}$ рассчитывают по формуле (4.77). При увеличении скорости (или Re) значение δ уменьшается и при $\delta \leq \Delta$ коэффициент трения все больше зависит от шероховатости из-за возникновения вихреобразного движения в районе выступов и, вследствие этого, дополнительных потерь напора.

Итак, с увеличением Re зона гладкого трения [$\lambda = f(Re)$] переходит сначала в зону смешанного трения, а затем в автомодельную (λ не зависит от Re) область, где сопротивление трению определяется только шероховатостью труб. Последнюю область часто называют областью квадратичного закона сопротивления, поскольку $H_{\text{тр}}$ становится пропорционально квадрату скорости [см. (4.73)].

Относительная шероховатость ($\varepsilon = \Delta/d$) определяет критические значения Re , при которых шероховатость начинает влиять на λ ($Re_{\text{кр1}}$) и λ становится функцией только шероховатости труб ($Re_{\text{кр2}}$).

При расчете коэффициента трения для всех зон турбулентного движения можно применять эмпирическое уравнение

$$1/\sqrt{\lambda} = -2 \lg [\varepsilon/3,7 + (6,81/Re)^{0,9}]. \quad (4.78)$$

Для области гладкого течения

$$1/\sqrt{\lambda} = -2 \lg (6,81/Re)^{0,9} = 1,8 \lg Re - 1,5. \quad (4.79)$$

Для автомодельной области в уравнении (4.78) отбрасывается второй член в скобках, выражающий зависимость λ от Re

$$1/\sqrt{\lambda} = -2 \lg \varepsilon/3,7. \quad (4.80)$$

Поскольку общие потери напора согласно (4.59) являются суммой потерь на трение и потерь на местное сопротивление, необходимо рассмотреть расчет потерь, характеризующих $H_{\text{м.с}}$. В местных сопротивлениях происходит изменение скорости потока по величине, направлению или по величине и направлению одновременно.

Аналогично выводу $H_{\text{тр}}$, пользуясь методом анализа размерностей,

$$H_{\text{м.с}} = \xi v^2 / (2g), \quad (4.81)$$

где ξ — коэффициент местного сопротивления; v — скорость потока после прохода местного сопротивления.

При нескольких, последовательно расположенных местных сопротивлениях

$$H_{\text{м.с}} = \sum \xi v^2 / (2g). \quad (4.82)$$

Коэффициент местных сопротивлений в большинстве случаев находят опытным путем.

Таким образом, выражение (4.59) с учетом уравнений (4.73) и (4.82) можно записать в виде

$$H_{\text{пот}} = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} + \sum \xi \frac{v^2}{2g} = \frac{v^2}{2g} \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \xi \right). \quad (4.83)$$

Учитывая, что $\Delta p = \rho g H_{\text{пот}}$, выражение для потери давления можно представить

$$\Delta p = (\lambda l/d + \sum \xi) \rho v^2 / 2. \quad (4.84)$$

В практике инженерных расчетов при вычислении потерь напора в местных сопротивлениях иногда вместо расчета по ξ проводят расчет только по λ , условно приравнивая потери напора в местных сопротивлениях к потерям напора в некоторой гипотетической трубе длиной $l_{\text{экв}}$. Длину $l_{\text{экв}}$, эквивалентную данному местному сопротивлению, выражают произведением диаметра на коэффициент n , определяемый опытом $l_{\text{экв}} = nd$. Тогда уравнение (4.83) можно записать

$$H_{\text{пот}} = \lambda \frac{l + \sum l_{\text{экв}n}}{d} \frac{v^2}{2g} = \lambda \frac{l + d \sum n}{d} \frac{v^2}{2g} = \lambda \left(\frac{l}{d} + \sum n \right) \frac{v^2}{2g}. \quad (4.85)$$

Значения коэффициентов n обычно приводятся в справочной литературе.

Основные виды местных потерь напора условно можно разделить на следующие группы: 1) потери, связанные с изменением сечения проводного канала, — внезапные и постепенные расширения и сужения трубопровода; 2) потери, вызываемые изменением направления, — колена, угольники, отводы трубопроводов; 3) потери за счет сопротивления различного вида арматуры — вентилей, кранов, клапанов и т. п.; 4) потери, вызываемые слиянием или отделением части потока, — тройники, крестовины и т. п.

По существу, все виды местных сопротивлений связаны с изменением сечения потока жидкости в проводном канале. На некотором расстоянии от местного сопротивления поток в силу инерции продолжает сохранять то же направление движения, которое

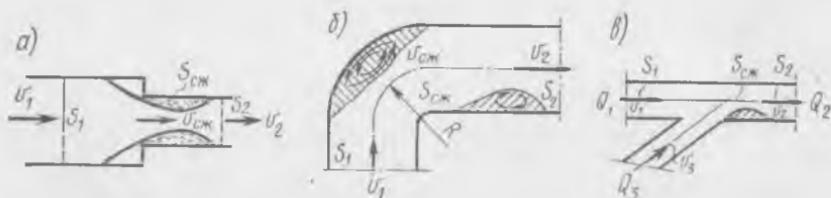
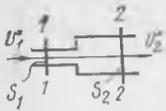
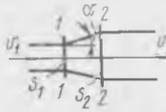


Рис. 4.15. Схема движения потока при изменении сечения или направления потока:

а — из широкой трубы в узкую; б — при плавном повороте; в — при слиянии потоков; v_1, S_1, Q_1 — соответственно скорость, площадь сечения потока и расход жидкости перед препятствием; v_2, S_2, Q_2 — то же, после препятствия; $v_{\text{сж}}, S_{\text{сж}}$ — скорость и площадь сечения потока в момент прохождения препятствия; v_3, Q_3 — скорость и расход жидкости в сливающемся потоке

Таблица 4.1. Коэффициенты местных сопротивлений

Вид местного сопротивления	Эскиз фасонной части	Коэффициент местного сопротивления								
Внезапное расширение проводного канала		$\xi_1 = (S_2/S_1 - 1)^2$								
Внезапное сужение проводного канала		$\xi_2 = 0,5(1 - S_2/S_1)$								
Постепенное расширение (диффузор)		$\xi_3 = (0,4 \dots 1)\xi_1$ при $\alpha = 20 \dots 40^\circ$								
Постепенное сужение (конфузор)		$\xi_4 = 0,1$ при $\alpha = 20 \dots 45^\circ$								
Вход в трубу		$\xi_5 = 0,5$ при острых кромках $\xi_5 = 0,05 \dots 0,2$ при закругленных кромках (при меньших R большие ξ)								
Выход из трубы в резервуар больших размеров		$\xi_6 = 1,0$								
Поворот угольником		<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td style="border: none;">α</td> <td style="border: 1px solid black;">30</td> <td style="border: 1px solid black;">60</td> <td style="border: 1px solid black;">90</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">ξ_7</td> <td style="border: 1px solid black;">0,6</td> <td style="border: 1px solid black;">0,96</td> <td style="border: 1px solid black;">1,2</td> </tr> </table>	α	30	60	90	ξ_7	0,6	0,96	1,2
α	30	60	90							
ξ_7	0,6	0,96	1,2							
Колено гнутое с радиусом гнутья R		<p>Для малых труб $\xi_8 = [0,131 + 0,163 (d/R)^{3,5}]$</p> <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td style="border: none;">R/d</td> <td style="border: 1px solid black;">2</td> <td style="border: 1px solid black;">4</td> <td style="border: 1px solid black;">5</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">ξ_8</td> <td style="border: 1px solid black;">0,7</td> <td style="border: 1px solid black;">0,3</td> <td style="border: 1px solid black;">0,2</td> </tr> </table>	R/d	2	4	5	ξ_8	0,7	0,3	0,2
R/d	2	4	5							
ξ_8	0,7	0,3	0,2							

Вид местного сопротивления	Эскиз фасонной части	Коэффициент местного сопротивления
Тройник проходной		$\xi_9 = 1$
Тройник ответвленный		$\xi_{10} = 1,5$
Тройник противоточный		$\xi_{11} = 3$
Задвижка на круглой трубе		Полностью открыта; $\xi_{12} = 0,12$; $h/d = 0,75$; $\xi_{12} = 0,26$; $h/d = 0,5$; $\xi_{12} = 2,06$;
Кран на круглой трубе при среднем открытии ($\alpha = 30^\circ$)		$\xi_{13} = 5 \dots 7$
Вентиль при среднем открытии		$\xi_{14} = 1 \dots 3$
Компенсатор П-образный гладкий		$\xi_{15} = 1,7$

он приобрел непосредственно перед препятствием. В результате этого в районе препятствия происходит отрыв потока от стенок трубопровода, за препятствием образуются местные завихрения (на рис. 4.15 эти области заштрихованы), которые и приводят к потерям напора.

В табл. 4.1 приведены значения коэффициента ξ для часто встречающихся случаев местных сопротивлений.

§ 4.11. Внешняя задача гидродинамики

Законы движения твердых тел в жидкости (или обтекание жидкостью твердых тел) имеют важное значение для расчета многих аппаратов, применяющихся при производстве строительных материалов. Знание этих законов позволяет не только более полно представить физическую сущность явлений, происходящих, напри-

мер, при транспортировании бетонной смеси по трубопроводам, перемешивании различного рода масс, движении частиц при сушке и обжиге во взвешенном состоянии, но и более правильно и экономично сконструировать технологические агрегаты и установки, применяемые для этих целей.

При обтекании неподвижной частицы потоком жидкости возникают гидродинамические сопротивления, зависящие в основном от режима движения и формы обтекаемых частиц. При небольших скоростях и малых размерах тел или при высокой вязкости среды режим движения ламинарный, тело окружено пограничным слоем жидкости и плавно обтекается потоком. Потеря давления в этом случае связана главным образом с преодолением сопротивления трения (рис. 4.16, а). С развитием турбулентности все большую



Рис. 4.16. Обтекание жидкостью твердого тела:
а — ламинарный режим; б — турбулентный режим

роль начинают играть силы инерции. Под действием их пограничный слой отрывается от поверхности, что приводит к понижению давления непосредственно за телом, образованиям в этой области завихрений (рис. 4.16, б). В результате возникает дополнительная сила сопротивления, направленная навстречу потоку. Поскольку она зависит от формы тела, ее называют *сопротивлением формы*.

Со стороны же движущейся жидкости на нее действует сила сопротивления, равная по величине добавочной силе давления жидкости на тело. Сумму обоих сопротивлений называют *сопротивлением давления*.

Начиная с некоторых значений критерия Рейнольдса роль лобового сопротивления становится преобладающей, а сопротивлением трения можно практически пренебречь. Как и в случае движения жидкости по трубам, в данном случае наступает автомодельный (по отношению к Re) режим.

Сопротивления движения и трения в общем случае существуют одновременно, и полное сопротивление, которое возникает при относительном движении тела и жидкости, представляет собой сумму этих сопротивлений. Таким образом,

$$p = p_{\text{дав}} + p_{\text{тр}}. \quad (4.86)$$

Соотношение между компонентами полного сопротивления в различных случаях различно.

Полное сопротивление определяется из формулы, предложенной Ньютоном:

$$p = c S \rho v^2 / 2. \quad (4.87)$$

Выражение (4.87) можно получить методом анализа размерностей.

Пусть основными параметрами при обтекании жидкостью твердого тела являются пять переменных: скорость v , плотность ρ , вязкость η , характерный размер тела l и сила сопротивления p . Согласно π -теореме, должны существовать $5-3=2$ безразмерных комплекса, имеющих следующий вид: $K_1=l^x v^y \rho^z p$; $K_2=l^x v^y \rho^z \eta$.

Исходя из условий безразмерности комплексов составим уравнения размерностей

$$L^{x_1} [LT^{-1}]^{y_1} [MLT^{-2}] [ML^{-3}]^{z_1} = L^0 M^0 T^0;$$

$$L^{x_2} [LT^{-1}]^{y_2} [ML^{-3}]^{z_2} [ML^{-1}T^{-1}] = L^0 M^0 T^0.$$

Приравнивая показатели степеней для K_1 , имеем $x_1 + y_1 - 3z_1 + 1 = 0$; $-y_1 - 2 = 0$; $z_1 + 1 = 0$, откуда $x_1 = -2$; $z_1 = -1$; $y_1 = -2$. Тогда $K_1 = p / (l^2 v^2 \rho)$. Для K_2 имеем $x_2 + y_2 - 3z_2 - 1 = 0$; $-y_2 - 1 = 0$; $z_2 + 1 = 0$, откуда $x_2 = y_2 = z_2 = -1$. Тогда $K_2 = \eta / (l \rho v)$.

Следовательно, общее уравнение будет иметь вид

$$f [p / (l^2 v^2 \rho); \eta / (l \rho v)] = 0.$$

Решая относительно p , имеем

$$p = \varphi [\eta / (l \rho v)] l^2 v^2 \rho. \quad (4.88)$$

Заменяя l^2 на S (характерную площадь) и принимая $\varphi[\eta / (l \rho v)] = c/2$, получим формулу (4.87). На рис. 4.17 представлена зависимость c от критерия Рейнольдса при движении шарообразных частиц диаметром d .

Из рисунка следует, что существует три области, каждой из которых соответствует определенный характер зависимости c от Re .

Ламинарная область (область действия закона Стокса) при $Re \leq 2$

$$c = 24 / Re. \quad (4.89)$$

Переходная область $Re = 2 \dots 500$

$$c = 18,5 / Re^{0,6}. \quad (4.90)$$

Автомодельная область $\sim 2 \cdot 10^5 > Re > \sim 500$

$$c = 0,44. \quad (4.91)$$

Рис. 4.17. Зависимость коэффициента сопротивления c от критерия Рейнольдса

Подставляем c в уравнение (4.87) и видим, что в ламинарной области сила сопротивления p пропорциональна скорости в первой степени, т. е. $p \sim v$, в переходной $p \sim v^{1,4}$, в автомодельной $p \sim v^2$.

При обтекании тел по форме, отличающихся от шара, значения коэффициента сопротивления больше и зависят не только от критерия Рейнольдса, но и от фактора формы $\psi = A_{ш}/A$, где $A_{ш}$ — поверхность шара, имеющего тот же объем, что и рассматриваемое тело поверхностью A .

§ 4.12. Осаждение частиц под действием силы тяжести

Законы движения двухфазных жидкостей (жидкость + взвесь твердых тел) имеют большое значение в инженерной практике. В промышленности строительных материалов взвесенесущие потоки применяют при пневмотранспорте цемента, гидротранспорте бетонной смеси, сушке и обжиге сыпучих материалов во взвешенном состоянии и других технологических процессах. Основные вопросы, интересующие инженера, — определение необходимой скорости транспортирования и потерь давления. Особенности взвесенесущих потоков в значительной степени определяются характером обтекания твердых частиц потоком жидкости или газа.

Пусть в вертикальной трубе диаметром D (рис. 4.18) движется частица в виде шара диаметром d ($D \gg d$). Поток направлен снизу вверх. На частицу действует сила давления потока P , направленная снизу вверх, и сила тяжести G . В зависимости от соотношения этих сил частица может подниматься, опускаться или оставаться неподвижной. Условие равновесия будет наблюдаться в том случае, если $P = G$. Это случай так называемого *витания частицы*.

Вес шара в неподвижной жидкой среде

$$G = \frac{1}{6} \pi d^3 (\rho_{\text{тв}} - \rho_{\text{ж}}) g. \quad (4.92)$$

Приравнивая силу давления потока [уравнение (4.87)] к силе тяжести, получим уравнение равновесия

$$c S \rho_{\text{ж}} \frac{v^2}{2} = \frac{\pi d^3}{6} (\rho_{\text{тв}} - \rho_{\text{ж}}) g, \quad (4.93)$$

откуда скорость витания частицы (т. е. скорость потока, при которой частица будет находиться в равновесии):

$$v_{\text{вит}} = \sqrt{4gd(\rho_{\text{тв}} - \rho_{\text{ж}})/(3c\rho_{\text{ж}})}. \quad (4.94)$$

В случае воздушных потоков с достаточной для инженерных расчетов точностью можно принять $\rho_{\text{тв}} - \rho_{\text{ж}} \approx \rho_{\text{тв}}$, так как плотность воздуха очень мала по сравнению с плотностью твердого тела. В этом случае формула (4.94) имеет вид

$$v_{\text{вит}} = 3,62 \sqrt{\rho_{\text{тв}} d / (\rho_{\text{ж}} c)}. \quad (4.95)$$

В реальных взвесенесущих потоках необходимо вводить поправку в эти формулы для учета влияния стенок и соседних частиц

$$v_{\text{вит,ст}} = E_{\text{ст}} v_{\text{вит}}, \quad (4.96)$$

где $E_{\text{ст}}$ — коэффициент стеснения, зависящий от соотношения d/D

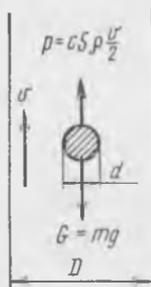


Рис. 4.18. Схема сил, действующих на частицу, находящуюся в восходящем потоке

и объемной концентрации частиц в потоке; коэффициент $E_{ст}$ определяется опытным путем.

Таким образом, тело, находящееся в потоке жидкости, будет находиться в состоянии равновесия (витать), если скорость витания $v_{вит}$ равна скорости движения жидкости v . Тело будет двигаться по направлению движения жидкости, если $v_{вит} < v$, и тело будет осаждаться под действием силы тяжести, если $v_{вит} > v$. В системах пневмотранспорта для надежного перемещения материала скорость движения воздуха обычно в 1,5..2 раза превышает скорость витания.

Для ламинарной области, подставляя в выражение (4.94) значение s из (4.95), получим

$$v_{вит} = d^2 g (\rho_{ТВ} - \rho_{ж}) / (18\eta), \quad (4.97)$$

где η — вязкость среды.

Максимальный размер частиц, осаждение которых происходит по закону Стокса, находим, подставляя в (4.97) значение $v_{вит}$ из критерия Рейнольдса, приняв $Re = v d \rho / \eta = 2$, тогда

$$d_{max} = \sqrt[3]{\frac{36\eta^2}{\rho_{ж} g (\rho_{ТВ} - \rho_{ж})}} = 1,56 \sqrt[3]{\frac{\eta^2}{\rho_{ж} (\rho_{ТВ} - \rho_{ж})}}. \quad (4.98)$$

При $Re \leq 10^{-4}$ и когда d становится соизмеримым с длиной среднего свободного пробега молекул λ , на скорость осаждения очень мелких частиц начинает влиять тепловое движение молекул среды, приводящее к отклонениям от закона Стокса. Тогда $v_{вит}$ следует разделить на поправочный коэффициент $K = f(\lambda/d)$.

Расчеты показывают, что при $d \approx 0,1$ мкм пыль, находящаяся в воздухе, не осаждается, а наблюдается лишь броуновское движение ее частиц.

§ 4.13. Смешанная задача гидродинамики

В технологии строительных материалов движение потоков через слой зернистых или кусковых материалов встречается достаточно часто. Практически ни один аэродинамический расчет в технологии керамики и вяжущих веществ не может быть проведен без знания законов движения жидкости через зернистые слои.

Зернистый слой может быть *монодисперсным* — из частиц одинакового размера или *полидисперсным* — из частиц различных размеров. Режим движения потока через такие слои зависит от многих факторов. На распределение скоростей прежде всего влияют физические свойства потока и физические и геометрические характеристики слоя, т. е. его структура.

Зернистый слой характеризуется:

1) порозностью слоя $\epsilon = (V - V_0) / V$, где V — общий объем зернистого слоя; V_0 — объем, занимаемый отдельными частицами слоя; таким образом, порозность есть отношение объема пустот в слое к общему объему слоя;

2) удельной поверхностью s ($\text{м}^2/\text{м}^3$ или $\text{см}^2/\text{г}$), т. е. отношением площади поверхности всех частиц к объему, занимаемому слоем, или его массе;

3) эквивалентным диаметром каналов $d_э$, их извилистостью;

4) скоростью витания частиц.

Потери давления при движении жидкости через зернистый слой могут быть подсчитаны по формуле, аналогичной потерям давления на трение в трубопроводах:

$$\Delta p_{\text{тр}} = \lambda \frac{l}{d_э} \frac{\rho v^2}{2}, \quad (4.99)$$

где λ — коэффициент, отражающий влияние не только сопротивления трения, но и дополнительных местных сопротивлений межзерновых каналов, т. е. λ является общим коэффициентом сопротивления.

Значительные трудности возникают в определении эквивалентного диаметра, который, как показано выше, равен $4A/P$. Для определения поверхности пустот необходимо объем всех пустот (т. е. $V - V_0$) разделить на длину всех каналов.

Пусть высота зернистого слоя равна h . Учитывая извилистость каналов, средняя их длина превышает высоту слоя в α_k раз. Если поперечное сечение слоя A , то пустотность слоя $V_{\text{св}} = Ah\varepsilon$ и свободное сечение слоя $A_{\text{св}} = Ah\varepsilon/(\alpha_k h) = A\varepsilon/\alpha_k$. Периметр свободного сечения может быть вычислен делением общей поверхности каналов на их среднюю длину, т. е. $P = Ahs/(\alpha_k h) = As/\alpha_k$. Тогда эквивалентный диаметр каналов зернистого слоя

$$d_э = 4 \left(\frac{A\varepsilon/\alpha_k}{As/\alpha_k} \right) = \frac{4\varepsilon}{s}, \quad (4.100)$$

т. е. эквивалентный диаметр равен учетверенной порозности слоя, деленной на удельную поверхность.

Определить действительную скорость $v_{\text{впт}} = v$, входящую в уравнение (4.97), очень трудно. Поэтому на практике прибегают к вычислению так называемой *фиктивной скорости* v_0 , равной отношению объемного расхода жидкости по всей площади поперечного сечения слоя. При ее подсчете пренебрегают кривизной каналов ($\alpha_k = 1$) и считают, что их длина l равна толщине слоя h . Тогда суммарное сечение каналов составит $Ah\varepsilon/h = A\varepsilon$ и объемный расход жидкости равен Asv . Но по определению фиктивной скорости объемный расход Av_0 , отсюда $A\varepsilon v = Av_0$ и

$$v = v_0/\varepsilon. \quad (4.101)$$

Фактическая скорость жидкости v меньше скорости, подсчитанной по выражению (4.101), и отличается от нее тем больше, чем больше α_k . Однако это различие не оказывает существенного значения, если в выражении (4.99) вместо l использовать высоту слоя h .

Подставляя в формулу (4.99) значения d_3 , v и l , получим

$$\Delta p_{\text{тр}} = \lambda \frac{h}{4\varepsilon/s} \frac{\rho (v_0/\varepsilon)^2}{2} = \lambda \frac{hs}{4\varepsilon} \frac{\rho v_0^2}{2\varepsilon^2} = \lambda \frac{hs}{4\varepsilon^3} \frac{\rho v_0^2}{2} \quad (4.102)$$

Как и при движении жидкости в трубах, коэффициент сопротивления λ зависит от режима течения, определяемого критерием Рейнольдса.

Подставляя в выражение $Re = vd_{3\rho}/\eta$ значения v и d_3 из (4.100) и (4.101), получим

$$Re = v_0 4\varepsilon \rho / (\varepsilon s \eta) = 4v_0 \rho / (\eta s) = 4W / (\eta s), \quad (4.103)$$

где W — массовая скорость жидкости.

Из опытных данных получено, что для всех режимов движения применимо обобщенное уравнение для расчета коэффициента сопротивления λ

$$\lambda = (133/Re) + 2,34. \quad (4.104)$$

При движении жидкости через зернистые слои турбулентность в потоке развивается гораздо раньше, чем при течении по трубам, без резкого перехода от одного режима к другому. Практически ламинарный режим существует при $Re < 50$. При $Re < 1$ вторым слагаемым можно пренебречь. При $Re > 7000$ наблюдается автомодельная (по отношению к Re) область турбулентного движения. Тогда $\lambda \approx 2,34 = \text{const}$.

Как видно из (4.102), потеря давления на трение в значительной степени зависит от порозности слоя, поскольку ε в уравнение входит в третьей степени. Порозность слоя во многом зависит от способа загрузки и от соотношения диаметров зерен и аппарата, т. е. от d/D . На практике при свободной засыпке доля свободного объема изменяется в пределах 0,35...0,5.

Отмечено, что плотность слоя, прилегающего к стенкам аппарата, меньше, чем в центре. Это связано с так называемым пристеночным эффектом. Чем больше D/d , тем меньше пристеночный эффект и тем меньше неравномерность распределения скоростей потока в центре и в периферийной зоне аппарата.

§ 4.14. Гидродинамика взвешенного слоя

При малых скоростях потока жидкости или газа, проходящего через зернистый слой снизу, последний остается неподвижным, так как поток проходит по межзерновым каналам, т. е. фильтруется через слой.

При увеличении скорости потока промежутки между частицами увеличиваются — поток как бы приподнимает их. Частицы приходят в движение и перемешиваются с газом или жидкостью. Образовавшуюся взвесь называют *взвешенным или псевдооживленным слоем*, так как масса твердых частиц в результате непрерывного перемешивания в восходящем потоке приходит в легкоподвижное состояние, напоминая кипящую жидкость.

Состояние и условия существования взвешенного слоя зависят от скорости восходящего потока и физических свойств системы — плотности, вязкости, размеров частиц и т. д. Выше уже говорилось, что в зависимости от скорости движения жидкости существует три режима, характеризующие взаимодействие газового потока и отдельного зерна материала (рис. 4.19): слой будет оставаться неподвижным в восходящем потоке, если $v_{\text{вит}} > v$ (фильтрация); слой будет находиться в состоянии равновесия (витания), если $v_{\text{вит}} \approx v$ (взвешенный слой); твердые частицы будут двигаться в направлении потока, если $v_{\text{вит}} < v$ (унос).

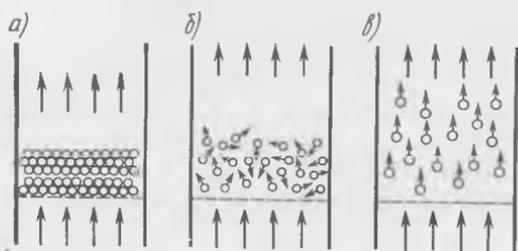


Рис. 4.19. Движение жидкости через зернистый слой:

а — неподвижный слой; б — кипящий псевдооживенный слой; в — унос частиц потоком

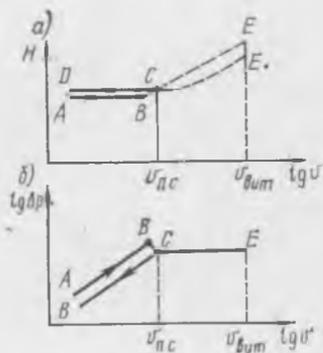


Рис. 4.20. Зависимость высоты слоя a и его гидравлического сопротивления b от скорости потока

На рис. 4.20 представлены типичные графики изменения высоты зернистого слоя и перепада давления в нем в зависимости от фактивной скорости.

Скорость, при которой нарушается неподвижность слоя, и он начинает переходить в псевдооживенное состояние, называют *скоростью псевдооживения* ($v_{\text{пс}}$). При увеличении v_0 до $v_{\text{пс}}$ высота слоя практически не изменяется, а гидравлическое сопротивление его возрастает. Перепад давлений в слое, соответствующий точке B (рис. 4.20, б), непосредственно перед началом псевдооживения (точка C) несколько больше необходимого для поддержания слоя во взвешенном состоянии, что объясняется действием сил сцепления между покоящимися частицами. При достижении потоком скорости $v_{\text{пс}}$ силы сцепления преодолеваются и перепад давлений становится равным весу части. Это условие выполняется для всей области существования псевдооживенного слоя (линия CE). При дальнейшем увеличении v_0 слой разрушается и начинается массовый унос частиц, соответствующий скорости $v_{\text{вит}}$.

Следовательно, пределы существования псевдооживенного слоя ограничены скоростями $v_{\text{пс}}$ и $v_{\text{вит}}$. Отношение рабочей скорости v_0

к скорости начала псевдооживления называют *числом псевдооживления* K_v

$$K_v = v_0/v_{nc}. \quad (4.105)$$

На практике скорость псевдооживления v_{nc} определяют в лабораторных или полупромышленных установках. Результаты измерений Δp и v изображают на графиках, подобных рис. 4.20. Расчетным путем v_{nc} может быть приближенно определена по формулам (4.94)—(4.98) с подстановкой соответствующих значений для d и l .

В промышленности строительных материалов чаще всего используют процессы псевдооживления в системе газ—твердая фаза. Для этой системы псевдооживление, как правило, является неоднородным: часть газа движется через слой в виде пузырей или через один или несколько каналов, по которым происходит проскок значительного количества газа.

При больших значениях K_v движение газа в виде пузырей приводит к неоднородности псевдооживленного слоя и колебаниям его высоты (линии CE и CE_1 на рис. 4.20, *a*), при этом пузыри могут увеличиваться до размеров всего поперечника аппарата. Тогда псевдооживленный слой разделяется газовыми пробками на отдельные слои, а прорыв газа сопровождается выбросом твердых частиц. Такой режим работы называют поршневым псевдооживлением. Он крайне нежелателен, так же как и фонтанирование, являющееся предельным случаем слияния потоков газа, движущегося по нескольким каналам в один, обычно вблизи оси аппарата.

Возникновению поршневого псевдооживления и фонтанирования, кроме повышенной скорости газа, способствуют для первого случая—увеличение размера частиц и уменьшение диаметра аппарата, для второго—применение мелких слипшихся частиц, способных к агломерации.

Поскольку процессы псевдооживления в настоящее время не поддаются точному расчету, их промышленная организация связана с проведением большого количества экспериментов и проверок в полупроизводственных условиях.

§ 4.15. Пленочное течение жидкости и барботаж

В промышленности многие технологические процессы сопровождаются пылением. Для обеспыливания отработанных газов применяют мокрую очистку, основанную на тесном контакте между запыленным газом и очищающей жидкостью.

Для образования значительной поверхности контакта чаще всего прибегают к такому приему, когда жидкость заставляют стекать под действием силы тяжести по вертикальной или наклонной стенке, а газ (или пар) направляется снизу вверх. Нашли

применение и такие аппараты, в которых газ проходит через слой жидкости, образуя отдельные струи, пузыри, пену и брызги. Такой процесс называется барботажем.

Для правильного конструирования аппаратов, действующих по этим принципам, а также для выбора оптимального режима их эксплуатации необходимо знать гидродинамику этих процессов. При течении тонких пленок жидкости по вертикальной или наклонной плоскостям возможны следующие случаи: 1) стекание пленки при контакте с неподвижным газом; 2) стекание пленки навстречу движущемуся потоку газа.

Механизм течения пленки навстречу газовому потоку зависит от скорости потока. При малых скоростях газа (до 3,5 м/с) встречный поток не оказывает существенного влияния на течение жидкости и режим ее движения определяется силой тяжести, вязкостью жидкости и силами, возникающими между стекающей жидкостью и поверхностью стенки. С увеличением скорости газовый поток тормозит стекание жидкости вследствие увеличения сил трения газа о жидкость. В результате этого скорость течения жидкости уменьшается, а толщина ее пленки увеличивается, вплоть до возникновения волны. При критической скорости газовый поток может вызвать срыв жидкостной пленки со стенки или обратное (инверсионное) течение пленки (рис. 4.21).

Характер течения пленки определяется значением числа Рейнольдса и скоростью встречного газового потока.

В промышленности строительных материалов барботирование воздухом применяют в основном в двух случаях:

1) при интенсификации перемешивания жидких масс иногда с одновременным их подогревом (в последнем случае чаще применяют пар); 2) для получения эмульсий и пен.

На рис. 4.22 приведены схемы прохождения газа или пара в барботерах различных типов. При барботаже различают два основных вида работы аппарата — пузырьковый и струйный. При малом расходе газа наблюдается пузырьковый режим. Прорыв газа через жидкость происходит отдельными пузырьками, размеры которых зависят от конструкции барботера, свойств жидкости и скорости газа.

Размер пузыря в момент отрыва от отверстия барботера можно вычислить. Примем, что d_0 — диаметр отверстия, $\rho_{ж}$ и $\rho_{г}$ — плотности жидкости и газа соответственно, σ — поверхностное натяжение.

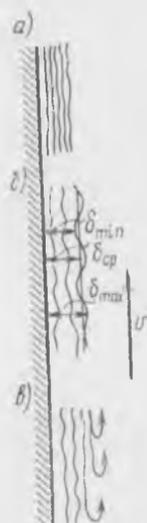


Рис. 4.21. Стекание пленки жидкости по вертикальной стенке:

a — ламинарное стекание; *б* — волновое стекание; *в* — срыв пленки (инверсия)

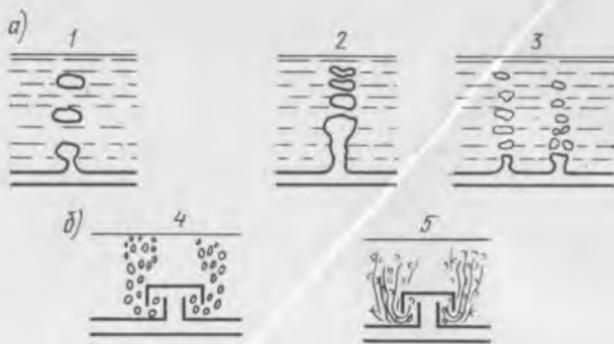


Рис. 4.22. Схемы прохождения газа через барботеры:

а — выход пузырей из одиночных 1, 2 или групповых отверстий 3 при малой 1 и повышенной 2, 3 скорости газа; б — то же, при колпачковых барбатерах с малой 4 и повышенной 5 скоростью

При выходе из отверстия пузырь сначала увеличивается в объеме, а затем отрывается и всплывает, когда подъемная (архимедова) сила и сила сопротивления отрыву равны, т. е.

$$\frac{\pi d^3}{6} g (\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{г}}) = \pi d_0 \sigma,$$

откуда

$$d = \sqrt[3]{6 d_0 \sigma / [g (\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{г}})]}. \quad (4.106)$$

Из уравнения (4.106) следует, что диаметр пузыря при свободном движении не зависит от расхода газа, а определяется d_0 и свойствами жидкости и газа. С увеличением расхода газа возрастает лишь частота пузырей.

Когда расход газа достигает критического значения ($V_{\text{кр}}$), пузыри не успевают оторваться друг от друга и движутся в виде цепочки, иногда сливаясь друг с другом (явление коалесценции), превращаясь в отдельную струю газа. Критический расход газа

$$V_{\text{кр}} = \frac{\pi d^2}{6} v_{\text{n}} = \frac{\pi v_{\text{n}}}{6} \left[\frac{6 d \sigma}{g (\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{г}})} \right],$$

где v_{n} — скорость подъема пузырей, м/с.

§ 4.16. Течение неньютоновских жидкостей

В предыдущих разделах рассматривались законы движения жидкостей, подчиняющихся закону внутреннего трения Ньютона $\tau = \eta dv/dy$. Вязкость этих жидкостей остается постоянной при данной температуре и давлении. В отличие от них вязкость неньютоновских жидкостей не постоянна, а изменяется в зависимости от скорости сдвига, его продолжительности, т. е. «предыстории» жид-

кости. В технологии строительных материалов к таким жидкостям относятся цементные шламы и растворы, бетонная смесь, глиняные шликеры и пасты, растворы полимеров, краски и т. п. Графики, выражающие зависимость изменения предельного напряжения сдвига от градиента скорости, носят название *кривых течения*.

В современной теории неньютоновские жидкости подразделяют на три класса.

К первому классу относятся вязкие или стационарные неньютоновские жидкости, для которых в уравнении $\tau = f(dv/dy)$ функция не зависит от времени.

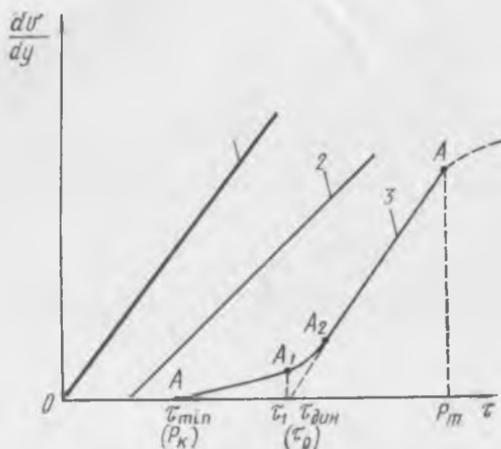


Рис. 4.23. Кривые течения ньютоновской и бингамовской жидкости:

1 — ньютоновская жидкость; 2 — бингамовская неструктурированная жидкость; 3 — то же, структурированная

По виду кривых течения различают бингамовские (рис. 4.23, кривая 2), псевдопластичные и дилатантные жидкости.

Течение *бингамовской жидкости* начинается только после приложения $\tau_0 \geq \tau$ (подсчитанного по уравнению Ньютона), которое необходимо для разрушения структуры, образовавшейся в данной системе. Такое течение называют пластическим, а критическое (т. е. предельное) напряжение сдвига τ_0 — пределом текучести. При напряжениях, меньших τ_0 , бингамовские жидкости ведут себя как твердые тела, а при напряжениях, больших τ_0 — как ньютоновские жидкости, т. е. зависимость τ_0 от dv/dy линейна.

Считается, что структура тела Бингама под действием предельного напряжения сдвига мгновенно и полностью разрушается, в результате чего тело Бингама превращается в жидкость, при снятии напряжения структура восстанавливается и тело возвращается к твердому состоянию.

Уравнение кривой течения носит название уравнения Шведова — Бингама

$$\tau = \tau_0 + \eta_{\text{пл}} \frac{dv}{dy}, \quad (4.107)$$

где $\eta_{\text{пл}}$ — пластическая вязкость постоянна и аналогична вязкости обычной жидкости.

Для большинства структурированных систем зависимость dv/dy от τ не выражается прямой, а представляет кривую (рис. 4.23, кривая 3).

П. А. Ребиндер, М. П. Волярович и другие различают два предельных напряжения сдвига: нижний предел текучести — статическое предельное напряжение сдвигу (τ_{min}), величина которого соответствует началу остаточной деформации (отрезок OA на кривой 3, где точка A — предел упругости), и динамическое предельное напряжение сдвига ($\tau_{\text{дин}} = \tau_0$), соответствующее уравнению Шведова — Бингама.

Кривую течения структурированной системы можно условно разбить на четыре области, характеризующие состояние системы в процессе нагружения. Область $A-A_1$ — практически прямая линия, в которой пластическое течение системы происходит без заметного разрушения структуры при наибольшей постоянной пластической вязкости (шведовской)

$$\eta_{\text{пл}} = \frac{\tau - \tau_1}{(dv/dy)_{\tau \rightarrow \tau_1}}. \quad (4.108)$$

Нарушения структуры в этой области столь незначительны, что успевают восстанавливаться в самом процессе течения.

П. А. Ребиндер и Н. В. Михайлов нижний предел текучести называют истинным пределом текучести P_R (соответствующий статическому предельному напряжению сдвига), который определяется величиной напряжения, ниже которого никакого течения не наблюдается (упругая область). Обычными методами область течения при мало разрушаемой структуре установить довольно трудно и при опытах часто получается совпадение точек τ_1 и τ_{min} .

Кривая A_1-A_2 — область пластического течения системы с постоянным разрушением структуры. Пластическая вязкость резко падает, вследствие чего скорость течения быстро увеличивается. Участок A_2-A_3 — область предельно разрушенной структуры, выше которой течение происходит с наименьшей пластической вязкостью (бингамовской)

$$\eta_{\text{пл}}^{\text{min}} = (\tau - \tau_2)/(dv/dy).$$

Переход от области пластического течения системы к области предельно разрушенной структуры характеризуются динамически предельным напряжением сдвига системы τ_0 . Дальнейшее увеличение напряжений системы завершается разрывом сплошности структуры, характеризующейся пределом прочности τ_{max} (P_m).

Псевдопластичные жидкости (рис. 4.24, кривая 1) начинают течь уже при самых малых значениях τ . Они характеризуются тем, что значение вязкости в каждой конкретной точке кривой зависит от градиента скорости. Поэтому для псевдопластичных жидкостей говорят о кажущейся вязкости, которая представляет собой отношение напряжения сдвига к градиенту скорости. С увеличением скорости сдвига кажущаяся вязкость этих жидкостей уменьшается.

По Оствальду, касательное напряжение для таких жидкостей

$$\tau = K (dv/dy)^m, \quad (4.109)$$

где K и m — постоянные коэффициенты, причем $m < 1$.

Коэффициент K зависит от консистенции жидкости и увеличивается с ростом вязкости.

При бесконечно большом градиенте скорости кривая течения постоянна и переходит в прямую с предельным значением $\eta_{\text{каж}} = \infty$.

K псевдопластическим жидкостям относятся растворы полимеров, целлюлозы и суспензии с асимметричной структурой частиц.

K дилатантным жидкостям (рис. 4.24, кривая 2) относятся суспензии крахмала, различные клеи с большим отношением T/J . В отличие от псевдопластических эти жидкости характеризуются возрастанием кажущейся вязкости с увеличением градиента скорости. Течение их может быть описано также уравнением Оствальда (4.109) при $m > 1$.

Ко второму классу относятся неньютоновские жидкости, характеристики которых зависят от времени (нестационарные жидкости). Для этих структур кажущаяся вязкость определяется не только градиентом скорости сдвига, но и его продолжительностью.

В зависимости от характера влияния продолжительности сдвига на структуру различают тиксотропные и реопектантные жидкости (рис. 4.25). У тиксотропных жидкостей с увеличением продолжительности воздействия напря-

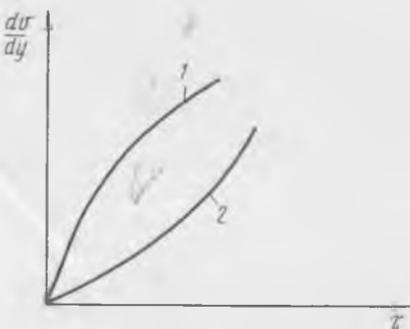


Рис. 4.24. Кривые течения псевдопластичных 1 и дилатантных жидкостей 2

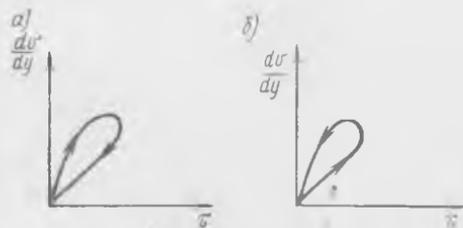


Рис. 4.25. Кривые течения тиксотропных а и реопектических жидкостей б

жения сдвига определенной величины структура разрушается, вязкость уменьшается, а текучесть возрастает. После снятия напряжения структура жидкости постепенно восстанавливается с увеличением вязкости. Типичным примером тиксотропных жидкостей являются многие краски, увеличивающие

вязкость со временем. У реопектических жидкостей с увеличением продолжительности воздействия напряжения сдвига текучесть снижается.

К этим жидкостям относятся суспензии бентонитовых глин и некоторые коллоидные растворы.

К третьему классу относятся вязкоупругие или максвелловские жидкости. Жидкости текут под действием напряжения τ , но после снятия напряжения частично восстанавливают свою форму. Таким образом, эти структуры обладают двойным свойством — вязким течением по закону Ньютона и упругим восстановлением формы по закону Гука. Примером их служат некоторые смолы и пасты, крахмальные клеи.

В отечественной литературе можно встретить несколько иную классификацию неньютоновских жидкостей.

Согласно классификации П. А. Ребиндера, по пластично-вязким свойствам дисперсные системы можно подразделить на нормально-вязкие (ньютоновские; рис. 4.23, кривая 1), аномально-вязкие (псевдопластичные, дилатантные, реопектические и тиксотропные; рис. 4.24, кривые 1, 2 и рис. 4.25, а, б) и пластичные (рис. 4.23, кривые 2, 3). Первые две системы П. А. Ребиндер объединяет в одну

группу и называет жидкообразными системами, последнюю — твердообразными системами.

Изменение вязкости в зависимости от напряжения сдвига для псевдопластичных, тиксотропных (жидкообразных) и пластично-вязких (твердообразных) систем представлено на рис. 4.26. Для жидкообразных систем при напряжениях, мень-

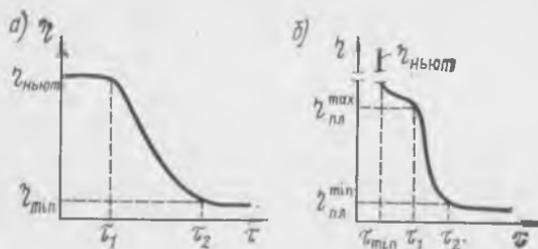


Рис. 4.26. Изменение вязкости в зависимости от напряжения сдвига для жидкообразных а и твердообразных б систем

ших τ_1 , вязкость имеет наибольшую величину, равную ньютоновской вязкости η практически еще не разрушенной структуры. При напряжениях, больших τ_1 , вязкость уменьшается до предельного значения η_{\min} .

Для твердообразных систем картина усложняется.

При напряжениях сдвига, меньших τ_{\min} , максимальная η (ньютоновская вязкость) неразрушенной структуры бесконечно велика. При дальнейшем повышении напряжения сдвига (до условной границы практически неразрушенной структуры) до τ_1 проявляется наибольшая пластическая вязкость $\eta_{\text{пл}}^{\text{max}}$ (шведовская) в области весьма небольших значений напряжений сдвига. При дальнейшем повышении напряжения сдвига в области постоянного разрушения структуры (до τ_2) пластическая вязкость постоянно уменьшается до $\eta_{\text{пл}}^{\text{min}}$, соответствующей бингамовской. Дальнейшее течение с

предельно разрушенной структурой до напряжения сдвига τ_{\max} происходит с условно постоянной вязкостью $\eta_{\text{пл}}^{\text{min}}$.

Течение неньютоновских жидкостей является предметом изучения науки о деформациях и течении — реологии. В последние годы значительно увеличилось число исследований реологических характеристик различных гидравлических систем. Наиболее подробно исследовано течение неньютоновских жидкостей, характеристики которых не зависят от времени.

Рассмотрим течение этих жидкостей при ламинарном режиме. Установившийся поток неньютоновской жидкости в цилиндрической трубе при изотермическом режиме находится под действием тех же сил, что и при течении ньютоновской жидкости.

В общем виде можно записать, что градиент скорости сдвига пропорционален касательному напряжению

$$-dv/dr = f(\tau). \quad (4.110)$$

Будем рассуждать так же, как и в случае течения ньютоновской жидкости (см. рис. 4.7). Выделим в движущемся потоке жидкости радиуса R цилиндр длиной l и радиусом r . Цилиндр будет находиться в равновесии, если разность давлений на участке l будет равна силе трения

$$(p_1 - p_2) = F. \quad (4.111)$$

Разность давлений определяется площадью живого сечения потока и гидростатических давлений на концах участка, т. е.

$$(p_1 - p_2) = \Delta p \pi r^2. \quad (4.112)$$

Сила трения определяется касательным напряжением, приложенным к поверхности цилиндра, т. е.

$$F = 2\pi r l \tau. \quad (4.113)$$

Тогда условие равновесия для выделенного цилиндра можно записать $\Delta p \pi r^2 - 2\pi r l \tau = 0$, откуда

$$\tau = \Delta p r / (2l). \quad (4.114)$$

Очевидно, что с увеличением радиуса выделенного цилиндра будет расти и касательное напряжение τ . Максимальным оно будет у стенки трубы.

$$\tau_{c\tau} = \Delta p R / (2l), \quad (4.115)$$

тогда

$$\tau = \tau_{c\tau} r / R. \quad (4.116)$$

Подставляя (4.116) в (4.110), получим

$$-dv/dr = f(\tau_{c\tau} r / R). \quad (4.117)$$

Проинтегрировав полученное уравнение, имеем

$$\int_v^0 -dv = \int_r^R f(\tau_{cr}r/R) dr,$$

откуда

$$v = \int_r^R f(\tau_{cr}r/R) dr, \quad (4.118)$$

Объемный расход жидкости, проходящей через элементарный объем

$$dV = v \cdot 2\pi r dr, \quad (4.119)$$

интегрируя по частям, получим

$$\int_0^V dV = \pi \int_0^R v \cdot 2r dr = \pi \left[vr^2 - \int_0^R r^2 dv \right]. \quad (4.120)$$

При $r=R$ $v=0$. Подставив v из уравнения (4.118), получим

$$V = \pi \int_0^R r^2 f(\tau_{cr}r/R) dr.$$

Из уравнения (4.116) $r=R\tau/\tau_{cr}$, тогда

$$V = (\pi R^3/\tau_{cr}^3) \int_0^{\tau_{cr}} \tau^2 f(\tau) d\tau. \quad (4.121)$$

Выражение (4.121) является обобщенным уравнением расхода для неньютоновских жидкостей. Подставляя значения $f(\tau)$, для различных групп можно получить уравнение расхода при ламинарном режиме в цилиндрической трубе.

Например, для бингамовских жидкостей уравнение расхода при ламинарном движении носит название уравнения Бэкингема и имеет вид

$$V = \frac{\pi r^4 \Delta p}{8\eta_{пл} l} \left[1 - \frac{4}{3} \frac{2l\tau_0}{\Delta p R} + \frac{1}{3} \left(\frac{2l\tau_0}{\Delta p R} \right)^4 \right], \quad (4.122)$$

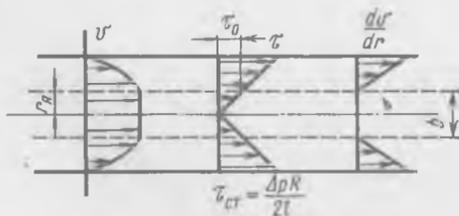


Рис. 4.27. Распределение скоростей в потоке бингамовской жидкости при ламинарном режиме:

b — ядро потока

Из рис. 4.27 видно, что напряжение сдвига падает до нуля в центре трубы, где существует зона, в которой скорость сдвига отсутствует. Жидкость в этой зоне движется как твердый поршень.

В тех случаях, когда зона ядра потока мала, в уравнении Бэкингема можно отбросить последний член. (При $r/R=0,5$ ошибка составит

около 6%, а при $r/R=0,4$ — только 2%.)

Тогда приближенное уравнение расхода будет иметь вид

$$V \approx \frac{\pi R^3}{4\tau_{\text{на}}} \left(\frac{\Delta p R}{2l} - \frac{4}{3} \tau_0 \right). \quad (4.123)$$

Для жидкостей, подчиняющихся степенному закону Оствальда, расход при ламинарном движении может быть подсчитан по формуле

$$V = \frac{m}{3m+1} \pi R^3 \left(\frac{\Delta p R}{2lk} \right)^{1/k}. \quad (4.124)$$

§ 4.17. Пневмо- и гидротранспорт

Область практического применения законов движения двухфазных систем в промышленности строительных материалов достаточно широка. Это и методы классифицирования сырья в жидкой и воздушных средах, сушка и обжиг материалов во взвешенном состоянии, обеспыливание газов, пневмо- и гидротранспорт.

Пневмо- и гидротранспорт в последние годы получил широкое распространение. Пневмотранспорт используют, например, на высокомеханизированных предприятиях сборного железобетона для разгрузки цемента из вагонов, транспортировки его в силосные склады и оттуда в расходные бункера; на заводах полимерных строительных материалов для транспортировки полистирола; на деревообрабатывающих предприятиях — для транспортировки опилок.

На предприятиях нерудной промышленности гидротранспорт песка и песчано-гравийной смеси — наиболее эффективный способ их транспортировки. На некоторых предприятиях сборного железобетона, на крупных стройках с большим объемом бетонных работ применяется гидротранспорт бетонных и растворяемых смесей.*

Из приведенных примеров следует, что инженеру-технологу, работающему в любой области производства строительных материалов, знание основ пневмо- и гидротранспорта необходимо в его практической деятельности.

Оба рассматриваемых вида транспортировки подчиняются единым законам гидромеханики, однако каждый из них имеет свою специфику, объясняющуюся свойствами транспортирующей среды.

Пневмотранспорт. Для характеристики пневмотранспорта большое значение имеет направление транспортирования, концентрация твердой фазы и размер транспортируемых частиц, давление в системе. По направлению транспортирование может быть вертикальным, горизонтальным и наклонным.

Сыпучий материал можно транспортировать в системах с высокой, средней и низкой объемной концентрацией твердого компонен-

* В технической литературе по сборному железобетону трубопроводный транспорт бетонной смеси относят к пневмотранспорту (см. ниже).

та. Концентрация твердой составляющей потока до $0,03...0,04 \text{ м}^3/\text{м}^3$ не оказывает заметного влияния на скорость витания частиц, поэтому ее с достаточной для инженерных расчетов точностью можно определить по формуле (4.94) или (4.95). Смеси, имеющие объемную концентрацию твердой фазы от $0,03...0,12 \text{ м}^3/\text{м}^3$, обычно относят к потокам средней концентрации, а выше $0,1...0,12 \text{ м}^3/\text{м}^3$ — к потокам высокой концентрации. В обоих случаях скорость витания рассчитывают по формуле (4.96), где коэффициент стеснения $E_{ст}$ устанавливают опытным путем.

По размеру транспортируемых частиц потоки подразделяют на пылевидные с диаметром частиц менее 1 мм и кусковые (гранулированные) с размером частиц более 1 мм.

Пневмотранспорт может быть нагнетательным и всасывающим. Движущей силой нагнетательного потока является избыточное давление, создаваемое в начале транспортной схемы. При всасывающем пневмотранспорте в конце транспортирования создается разрежение и вся система находится в вакууме. При транспортировании пылевидных смесей последняя схема предпочтительнее, поскольку исключает пыление и загрязнение окружающей среды.

Для расчета пневмотранспорта необходимо знать: характеристики твердой фазы — размер частиц, их фракционный состав и плотность; газовой фазы — температуру, плотность, вязкость; количество твердого материала, которое нужно перемещать в единицу времени (грузоподъемность).

Помимо этих сведений должны быть известны технологические особенности процесса, для которого предназначен пневмотранспорт. Если пневмотранспорт является частью технологической установки, то такие параметры, как температура и давление, а также физические и химические свойства твердой и газовой фаз, нужно учитывать при выборе способа пневмотранспорта при его расчете.

У большинства сыпучих материалов, перемещаемых пневмотранспортом, твердые частицы имеют неодинаковые размеры. Распределение их по размерам описывается дифференциальной или интегральной кривой распределения (см. гл. 3). Поэтому при полидисперсном материале часто ограничиваются расчетом скорости витания частиц с размером, равным среднему диаметру. Необходимо иметь в виду, что при высокой полидисперсности скорость витания для частиц разного размера может существенно отличаться от скорости витания, подсчитанной по среднему диаметру. Это следует учитывать при выборе скорости транспортирующего потока.

Выше указывалось (см. § 4.11), что коэффициент сопротивления s в формуле (4.87) зависит не только от критерия Рейнольдса, но и от фактора формы Φ , часто называемым геометрическим коэффициентом формы. Форма частицы влияет на степень турбулизации потока: чем больше геометрический коэффициент формы, тем при меньших числах Рейнольдса наступает турбулентный режим обтекания. Например, при $\Phi=1,2$ переход к турбулентному режиму осуществляется при $Re=500$, аналогично $\Phi=1,5$ — $Re=400$, $\Phi=2$ — $Re=350$.

В табл. 4.2 приведены геометрические коэффициенты формы для некоторых материалов.

Таблица 4.2. Геометрический коэффициент формы для частиц разных материалов

Материал	Плотность частицы, кг/м ³	Преобладающая форма частиц	Геометрический коэффициент формы
Вспученный перлит	2280	Округлые и продолговатые с ноздреватой поверхностью	1,3 ... 1,5
Вермикулит: невспученный	2750	Тонкие пластинки	1,9 ... 2,0
вспученный	1000 ... 1200	Пластинки	1,4 ... 1,6
Кварцевый песок	2650	Угловатые	1,15 ... 1,2

Из приведенных данных следует, что частицы, имеющие одинаковую поверхность, но различный геометрический коэффициент формы (например, вермикулит и кварцевый песок), будут иметь различную $u_{\text{вит}}$. Для частиц, по форме резко отличающихся от сферы, выражать эквивалентный диаметр в виде диаметров сфер, эквивалентных по поверхности (или объему), может оказаться недостаточным. Так, применительно к частицам древесины (опилки) установлено, что наиболее близок к реальному эквивалентный диаметр шара, аэродинамически подобной частице неправильной формы. Аэродинамическое подобие в этом случае устанавливают по равенству скоростей витания частицы шарообразной и неправильной формы.

Таким образом, в понятие «размер частиц», являющийся, как указывалось выше, важнейшей характеристикой транспортируемой твердой фазы, входит: средний диаметр частиц и значения отклонений от него как в меньшую, так и в большую сторону; геометрический, а иногда и аэродинамический коэффициенты формы.

Часто в технической литературе скорость, при которой твердая частица, находящаяся на дне горизонтальной трубы, начинает двигаться, называют *скоростью троганья* или *скоростью веянья*. Существуют две гипотезы, объясняющие возникновение подъемной силы, заставляющей твердую частицу двигаться. Согласно первой, наличие подъемной силы объясняют срывом вихрей при обтекании частицы, находящейся в пристеночной области. Возникающая при этом в результате силы тяжести вертикальная составляющая скорости постепенно уменьшается и частица вновь возвращается в в пристеночную область, где она снова подвергается воздействию вихрей. Перемещение частицы вдоль трубы и происходит за счет таких скачкообразных движений. Согласно второй, более поздней гипотезы, подъемная сила обуславливается вертикальными составляющими пульсационных скоростей (см. § 4.5).

В горизонтальном направлении можно транспортировать твердые частицы и при скоростях, меньших скорости их витания в го-

горизонтальном потоке. В этом случае движение зернистого материала по трубопроводу происходит вследствие перекатывания и волочения твердых частиц. Для этого необходимо преодолеть силы трения между частицей и стенкой. Поскольку сила трения есть произведение массы частицы на коэффициент трения, который меньше единицы, то для перекатывания и волочения частиц в горизонтальном направлении сила воздействия потока на них может быть меньше их массы. Однако скорость, необходимая для начала горизонтального движения частиц без перекатывания, всегда выше, чем скорость витания в вертикальном потоке.

Наклонные потоки занимают промежуточное положение.

Существенной характеристикой пневмотранспорта является его коэффициент полезного действия. Он представляет собой отношение полезной работы к работе, затраченной на сжатие транспортирующего потока. В данном случае полезная работа определяется как произведение веса твердой фазы на длину транспортирования. Для пневмотранспорта с низкой концентрацией твердой фазы характерны высокие скорости потока при невысоких потерях давления. Потоки с высокой концентрацией твердой фазы характеризуются, наоборот, низкими скоростями и сравнительно высокими перепадами давления.

Теоретически доказано, что максимальная эффективность вертикального пневмотранспорта достигается либо при низкой объемной концентрации твердой фазы, либо при концентрации, приближающейся к плотности материала в рыхлонасыпанном состоянии. По опытным данным КПД пневмотранспорта с низкой концентрацией твердого компонента составляет 8...10%, с высокой — 12...15, а иногда и до 20...22%.

При вертикальном пневмотранспорте сыпучего гранулированного крупнозернистого материала (более 1...2 мм) с невысокой концентрацией твердой фазы обычно считают, что при установившемся режиме (на средних участках транспортной схемы) средняя скорость транспортирующего потока равна сумме скоростей движения частиц и их витания

$$v = v_{\text{тв}} + v_{\text{вит}}. \quad (4.125)$$

При пылевидных потоках со средними и высокими концентрациями твердой фазы по практическим данным разность $v - v_{\text{тв}}$ в 3...8 раз больше скорости витания $v_{\text{вит}}$.

При достаточно высоких концентрациях твердой фазы, когда расстояние между частицами малы, может случиться так, что часть частиц попадает в гидродинамический след других, летящих впереди. При этом лобовое сопротивление снижается и частицы выпадают из потока — происходит «завал» транспортируемой смеси. Завал также может произойти и при невысоких концентрациях пылевидного материала, склонного к агломерации. В этом случае скорость потока бывает недостаточна для создания восходящего движения достаточно больших агломератов. В этом случае разность

между скоростями потока и частиц равна скорости витания одиночной частицы.

Имеется ряд эмпирических формул для определения скоростей потока, при которых происходит завал $v_{зав}$. Общая функциональная зависимость связывает $v_{зав}$ с массовой концентрацией твердой фазы в потоке m , скоростью движения частиц $v_{ТВ}$ и скоростью их витания $v_{вит}$

$$v_{зав} = f(m; v_{ТВ}; v_{вит}). \quad (4.126)$$

При горизонтальном пневмотранспорте в верхней половине пневмопровода скорость газа выше, а концентрация твердой фазы ниже, чем на дне трубопровода. При определенных режимах частицы материала в нижней части могут быть неподвижными и горизонтальное транспортирование будет протекать лишь в верхней половине пневмопровода (рис. 4.28).

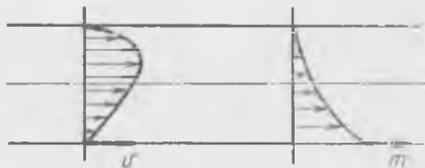


Рис. 4.28. Эпюры скоростей v газового потока и концентрации m твердой фазы при горизонтальном пневмотранспорте

Соотношение между скоростями газа и твердого компонента зависит от режима движения. Скорость газового потока, при которой твердые частицы транспортируются в горизонтальном направлении, не оседая на дно трубопровода, называют критической $v_{кр}$. Она зависит от плотностей транспортирующего потока $\rho_{ж}$ и твердой фазы $\rho_{ТВ}$, диаметра частиц d , массовой концентрации твердой фазы m , диаметра D и длины трубопровода L . Функциональная зависимость имеет вид

$$v_{кр} = f'(\rho_{ТВ}/\rho_{ж}; d; m; D; L). \quad (4.127)$$

Установлена связь между скоростью горизонтального транспортирующего потока и соотношением между ней и скоростью витания частиц в вертикальном потоке. Чем ниже скорость витания частиц в вертикальном потоке, тем больше отношение скоростей транспортирующего воздуха и витания частиц. Эту зависимость объясняют попаданием мелких частиц в область пограничного слоя. Для перевода их во взвешенное состояние необходимо создать вихри для срыва пограничного слоя и подъема частицы со дна, что требует увеличения средней скорости потока. Частицы, размер которых больше толщины пограничного слоя, ощущают гидродинамическое воздействие потока даже при сравнительно низких его скоростях.

На входном участке вертикального и горизонтального пневмопровода режим движения неустановившийся; такой участок называют разгонным. Часто при высоких скоростях транспортирующего вертикального потока сечение верхней части пневмоподъемника увеличивают для снижения скорости выхода твердых частиц из подъемного стояка; такой участок называют тормозным.

На основном участке со стационарным движением перепад давления определяется касательными напряжениями между потоком пневмовзвеси и стенками трубопровода. В случае вертикального пневмотранспорта к этому добавляется статический напор, определяемый весом твердого материала, находящегося в подъемном стояке. Статический напор самого транспортирующего потока по сравнению со статическим напором твердой фазы пренебрежимо мал и обычно в инженерных расчетах не учитывается. На разгонном и тормозном участках к этим потерям добавляется динамическая потеря напора, определяемая изменением скорости несущего потока. Тогда общая потеря напора в пневмопроводе может быть представлена следующими уравнениями:

для вертикального пневмотранспорта

$$\Delta p = \Delta p_{\text{г}} + \Delta p_{\text{ст}} + \Delta p_{\text{т}} + \Delta p_{\text{д}} + \Delta p_{\text{н}}; \quad (4.128)$$

для горизонтального пневмотранспорта

$$\Delta p = \Delta p_{\text{г}} + \Delta p_{\text{т}} + \Delta p_{\text{д}} + \Delta p_{\text{н}}, \quad (4.129)$$

где индексы «г», «ст», «т», «д» и «н» означают соответственно газ, статический вес твердой фазы, твердый материал, динамический напор и сопротивление на участке с неустановившимся движением.

Подробный инженерный расчет пневмотранспорта достаточно сложен и приводится в специальной литературе.

На рис. 4.29 приведена принципиальная схема пневмотранспорта цемента на заводах сборного железобетона. Поступивший на

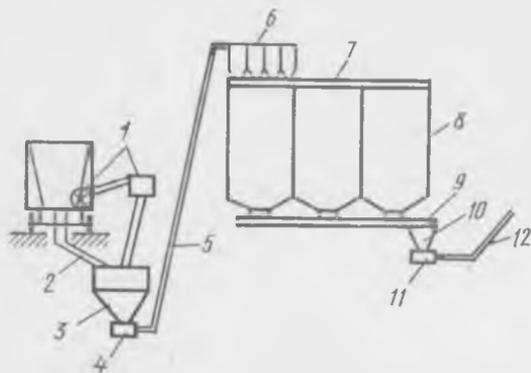


Рис. 4.29. Принципиальная схема пневмотранспорта цемента на заводах ЖБИ:

1 — вакуум-разгрузчик цемента; 2 — течка; 3, 10 — приемный бункер; 4, 11 — камерный питатель; 5, 12 — пневмопровод; 6 — осадительные устройства; 7, 9 — аэрожелоб; 8 — силосные банки

завод в специальных вагонах цемент разгружается вакуум-разгрузчиком 1 и направляется по течке 2 в бункер 3, откуда двухкамерным питателем 4 по трубопроводу 5 через систему осадительных устройств 6 цемент аэрожелобом 7 распределяется в силосные банки 8. Около 20% площади наклонных днищ силосов оборудованы аэрационными коробами, предназначенными как для облегчения разгрузки, так и для гомогенизации различных партий вяжущего, поступившего на завод. Через тчки по аэрожелобу 9 цемент

попадает в бункер 10, откуда питателем 11 по пневмопроводу 12 подается в бетоносмесительный узел завода.

Расход сжатого воздуха в системе зависит от вида питателя (камерные, пневмовинтовые и др.), расстояния транспортирования и колеблется в пределах 0,025...0,04 м³/кг материала при давлениях 0,12...0,6 МПа.

Применение пневмотранспорта цемента экономически целесообразно при подаче на высоту более 20 м. При меньшей высоте подъема устанавливают обычные ковшовые элеваторы.

Пневмотранспорт пылевидных материалов в аэрогравитационных желобах (рис. 4.30) основан на способности псевдооживленного

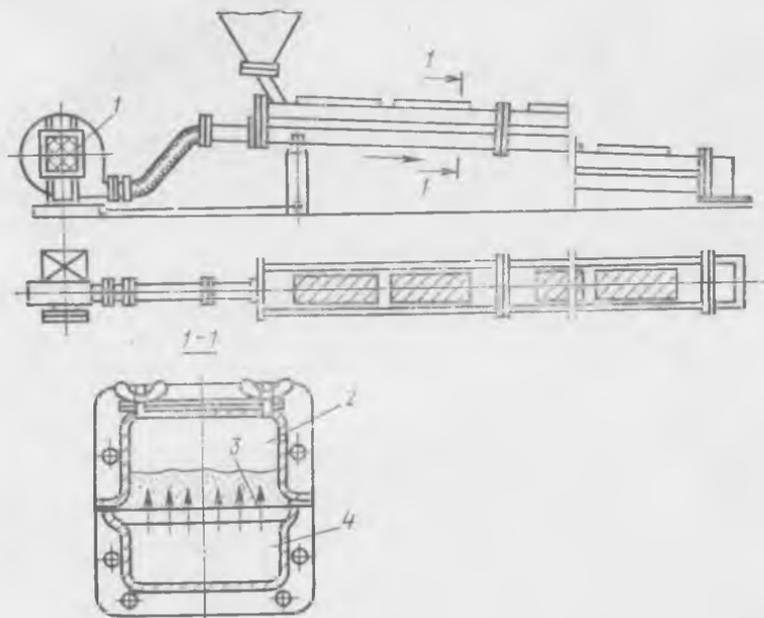


Рис. 4.30. Схема аэрожелоба для горизонтального транспортирования цемента

материала перетекать непрерывным потоком в определенном направлении. Желоб состоит из двух отсеков, разделенных горизонтальной пористой перегородкой 3. В нижний отсек 4 поступает газовый поток, нагнетаемый вентилятором 1, и через пористую перегородку проникает вверх в транспортный отсек 2, оживая находящийся там материал. Желобу придается небольшой уклон в сторону движения псевдооживленного материала. Перфорированные перегородки изготовляют из керамических пористых плит, стекло- и хлопчатобумажных тканей, металлических перфорированных сит и т. д.

Производительность пневможелобов прямо пропорциональна уклону и растет с увеличением скорости транспортирующего потока. Применительно к пневмотранспорту цемента для определения ско-

рости его движения применяют известную в гидравлике формулу Шези:

$$v = KV\sqrt{Pi}, \quad (4.130)$$

где K — эмпирический коэффициент; P — смоченный периметр; i — уклон желоба.

Производительность желобов, выпускаемых отечественной промышленностью, составляет 25...160 т/ч при длине 10...40 м и мощностях электропривода 0,6...4,5 кВт. Давление, необходимое для транспортирования, зависит от длины желоба и составляет 2350...2900 Па.

Гидротранспорт. Применительно к гидротранспорту твердый материал по гранулометрическому составу подразделяют на кусковой размером частиц более 2...3 мм, грубодисперсный — 0,15...3 мм и тонкодисперсный — менее 0,15...0,2 мм. Механизм взаимодействия твердых частиц крупнозернистого материала и взвешенного жидкостного потока идентичен пневмотранспортному потоку. Однако между ними имеется и существенное различие: при гидротранспорте разница в плотностях транспортирующего потока и транспортируемого материала значительно меньше, чем при пневмотранспорте; велико различие транспортирующих сред и по вязкости. Оба эти обстоятельства существенно влияют на скоростные характеристики потока и потери напора (а следовательно, и энергозатраты) в транспортных системах. Так, гидротранспорт возможен при значительно меньших скоростях потока, чем пневмотранспорт.

По мере уменьшения размера твердых частиц и повышения их концентрации движение обуславливается не только законами гидродинамики, но и физико-химическими процессами на границах раздела твердой и жидкой фаз, в том числе и образованием структурных связей. Структурные связи начинают возникать при наличии в гидросмеси твердых частиц менее 75...100 мкм. Создание таких связей в значительной степени зависит от молекулярного сродства между твердой и жидкой фазами и молекулярного (ионного) взаимодействия на границах фаз, определяемого этим сродством (см. гл. 7).

В технической литературе по гидротранспорту тонкодисперсные гидросмеси часто называют структурированными жидкостями. Течение их подчиняется законам течения неньютоновских жидкостей (см. § 4.16).

Структурные гидросмеси могут быть стабильными и нестабильными. Первые способны к длительному хранению в неподвижном состоянии без расслаивания. Существенным свойством их является низкая скорость осаждения твердой фазы. Стабильность гидросмесей в потоке выше, чем в состоянии покоя. Во время движения даже нестабильные гидросмеси приобретают стабильность. Последнее достигается двумя способами: соответствующим подбором зернового состава твердой фазы и добавкой специально подобранных поверхностно-активных веществ. Таким образом, структурные и динамические характеристики потока определяются зерновым составом

твердой фазы и физико-химическим сродством жидкости и твердого материала.

В полидисперсных смесях могут появляться свойства тонко- и грубодисперсных смесей в зависимости от относительного содержания этих фракций в смеси и физико-химического сродства твердой и жидкой фаз.

При введении в поток чистой жидкости твердой фазы симметричное скоростное поле (см. рис. 4.8 и 4.27) нарушается. Вдоль верти-

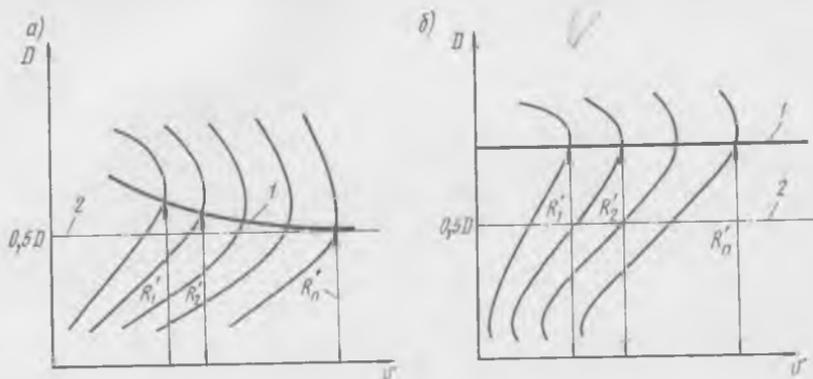


Рис. 4.31. Положение гидродинамической оси (1) по отношению к геометрической оси (2) и величина гидродинамического радиуса (R_1, R_2', \dots, R_n') при изменении скорости взвесенесущего потока:

а — мелкозернистая взвесь; б — крупнозернистая взвесь

кального диаметра горизонтального гидропровода максимум скорости при определенных условиях перемещается с геометрической оси в верхнюю половину трубы (рис. 4.31, а). Асимметрия скоростного поля увеличивается при уменьшении скорости потока, увеличении плотности и концентрации твердой фазы. По мере увеличения этой асимметрии все большая часть твердого материала сосредотачивается в нижней половине трубы. Так как это вызывает возрастание сопротивления потоку в призонной области, то большая часть взвесенесущего потока проходит по верхней половине трубы. Линия 1 максимальной скорости потока, называемая гидродинамической осью, расположена выше геометрической оси трубы 2 и приближается к оси по мере увеличения средней скорости потока. Расстояние от нижней стенки горизонтального трубопровода до гидродинамической оси иногда называют гидродинамическим радиусом R' . Это понятие не следует путать с гидравлическим радиусом R_r , который (см. § 4.4) есть отношение площади живого сечения потока к смоченному периметру проводного канала.

При организации гидротранспорта необходимо учитывать, какой материал транспортируется — мелкозернистый или грубодисперсный и кусковой. Классификация материала по крупности оказывается недостаточной при рассмотрении поля скоростей потока. Исследованиями установлено, что начиная с некоторого диаметра

частиц изменение скорости потока не вызывает увеличения ни гидродинамического радиуса R' , ни гидравлического сопротивления Δp . Применительно к гидротранспорту это положение принято считать границей разделения твердой фазы на мелкозернистую и грубозернистую. Понятия «мелкозернистый» и «грубозернистый» являются относительными и зависят от соотношения между диаметрами частиц и трубопровода. Согласно экспериментальным данным, крупнозернистыми считаются взвеси с размером твердой фазы более 1 мм в трубопроводе диаметром 25 мм, более 2 мм при $D = 50$ мм, более 5...7 мм при $D = 100$ мм и более 6...8 мм при $D = 200$ мм.

При транспортировании грубозернистой смеси также наблюдается асимметрия скоростного поля по вертикальному диаметру потока (рис. 4.31, б). Однако в отличие от мелкозернистых смесей она остается неизменной при изменении скорости ($R_1' = R_2' = \dots R_n' = \text{const}$). Характер кривых, характеризующих скоростные поля мелкозернистой и грубозернистой взвеси, также различен. Градиент скорости dv/dy мелкозернистой взвеси, так же как и однородной жидкости, возрастает по мере приближения к стенкам трубы. В потоках крупнозернистого материала градиент скорости по мере приближения к низу трубы сначала увеличивается, а на некотором расстоянии от дна уменьшается (перегиб кривой профиля скорости ниже гидродинамической оси на рис. 4.31, б).

При горизонтальном гидротранспорте в нижней половине поперечного сечения трубы концентрация твердого материала выше, чем в верхней. При скорости ниже определенного предела часть материала может оседать на дно трубопровода. Различают две критических скорости потока гидросмеси — скорость сальтации ($v_{\text{кр}}^c$) и минимальную скорость гидротранспортирования ($v_{\text{кр}}^T$). Под $v_{\text{кр}}^c$ принимают скорость потока, при которой часть твердых частиц периодически останавливается, а затем вновь начинает скользить по дну трубы; $v_{\text{кр}}^T$ — это средняя скорость потока гидросмеси, при которой не образуется слоя твердых частиц, скользящих по дну трубы в направлении движения потока. Отсюда следует, что $v_{\text{кр}}^T > v_{\text{кр}}^c$. Обе критические скорости зависят от физических свойств жидкости и твердой фазы, диаметра трубопровода и концентрации твердого материала.

При вертикальном гидротранспорте твердые частицы распределяются по поперечному сечению трубы неравномерно. Установлено, что при ламинарном режиме восходящего потока частицы подвержены радиальным перемещениям (эффект Сегре — Зильберберга). Неравномерность концентраций твердой фазы зависит от этих перемещений и определяется соотношением твердой и жидкой фаз, направлением движения потока и его скоростью.

Таким образом, структура потока при вертикальном гидротранспорте характеризуется наличием ядра потока из концентрированной жидкости, которое, как установлено исследованиями, формируется на определенном расстоянии от входа гидросмеси в гидродъемник. Участок, на котором оно формируется, называют уча-

стком стабилизации. Следовательно, характеристиками структуры потока являются длина участка стабилизации и отношение радиуса ядра потока R_0 (не путать с ядром потока чистой жидкости) к радиусу трубы R . Отношение R_0/R зависит от скорости потока и становится минимальным при нижней критической скорости жидкости $v_{кр}^н$, равной скорости витания частиц. По мере увеличения скорости радиус ядра растет и при верхней критической скорости $v_{кр}^в$, характеризующейся равномерным распределением твердой фазы по сечению потока, становится равным единице. На $v_{кр}^в$ влияет диаметр трубы: при уменьшении диаметра верхняя критическая скорость увеличивается. Экспериментально установлено, что эффект Сегре — Зильберберга проявляется только при ламинарном движении и при $Re > 2300$ исчезает.

Затрата энергии при гидротранспорте (так же, как и при пневмотранспорте), определяющая экономику процесса, зависит от потери напора. Потеря напора на перемещение чистой жидкости увеличивается пропорционально квадрату скорости потока (см. § 4.10). В то же время повышение скорости способствует более равномерному распределению твердых частиц в потоке, а также предотвращает их оседание на дно трубы и взаимные столкновения при горизонтальном пневмотранспорте. В связи с этим уменьшается затрата энергии на перемещение твердых частиц в общей потере напора. Таким образом, по мере увеличения скорости транспортирования основная энергия затрачивается на перемещение жидкости, что снижает коэффициент полезного действия системы.

По мере уменьшения скорости общая потеря напора снижается с одновременным увеличением доли потерь на перемещение твердой фазы. После достижения минимума, при котором большая часть частиц осела на дно, потеря напора вновь начинает расти (случай, мало интересный для практики гидротранспорта).

Наиболее экономично осуществлять транспортирование гидровзвеси при скорости потока, близкой к минимальной. При этом общая потеря напора невелика и затраты на перемещение твердого материала максимальны. С практической точки зрения такая система организации гидротранспорта рациональна, когда технолога не очень интересует изменение состава смеси в процессе транспортирования.

Практические расчеты гидротранспорта приводятся в специальной литературе.

Изложенные выше теоретические аспекты гидротранспорта справедливы для взвесей малой и средней концентрации, в частности при транспортировании песчаных и гравийно-песчаных смесей.

Трубопроводный транспорт бетонных и растворных смесей имеет свою специфику. Подача бетонной смеси от бетоносмесительного отделения к постам укладки по трубам на расстоянии до 250 м практикуется, например, на заводах с кассетной технологией. Она имеет ряд преимуществ: при подаче по трубам нет потерь бетона, создаются благоприятные санитарно-гигиенические условия труда, трубопроводы занимают мало места. Вместе с тем трубопроводный

транспорт имеет и свои недостатки: пластичные смеси с осадкой конуса 8 см и выше подвержены расслаиванию; жесткие смеси требуют повышенного расхода сжатого воздуха, установки для их транспортирования менее надежны и нередко выходят из строя.

Различают два способа подачи бетонной смеси: порционный и непрерывный.

При порционном способе бетонная смесь загружается в камерный питатель и давлением воздуха транспортируется по бетоноводу до места укладки. Разновидностью этого способа является разделение в трубопроводе каждой порции бетона воздушными прослойками. При порционной транспортировке бетонной смеси в отличие от транспортирования единичной порции резко сокращается расход воздуха. Порционная подача бетонной смеси, поступающей в трубопровод, производится следующим образом: лопасти смесителя 1

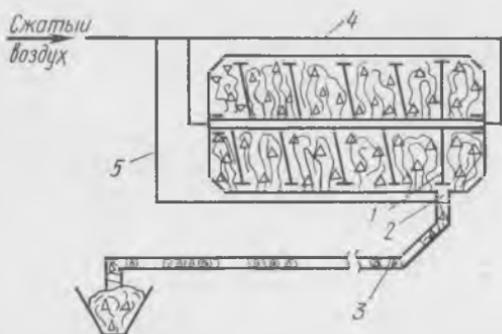


Рис. 4.32. Принципиальная схема порционной транспортировки бетонной смеси:

1 — лопасти смесителя; 2 — выходное отверстие бетоновод; 3 — бетоновод; 4, 5 — воздуховоды

(рис. 4.32) при вращении перекрывают выходное отверстие нагнетательного резервуара 2, на короткое время препятствуя поступлению смеси в бетоновод 3. Сжатый воздух в нагнетательный резервуар и бетоновод подается постоянно по воздуховодам 4 и 5.

При непрерывном способе подачи порция бетонной смеси из питателя воздухом вытесняется в бетоновод, освобождая питатель для следующей порции. Каждая выдавли-

ваемая порция смеси продвигает по бетоноводу предыдущую. При этом, естественно, давление воздуха должно быть значительно выше, чем при порционном способе, так как необходимо продвинуть всю массу бетона, находящегося в бетоновод. Поскольку сопротивление движению зависит от пластично-вязких характеристик бетонной смеси, такой способ транспортировки практически возможен только для подвижных смесей, да и то на значительно меньшие расстояния. По данным НИИЖБа, предельная длина сплошного стержня бетонной смеси $L_{пр}$, которую можно протолкнуть по трубопроводу,

$$L_{пр} = Dp / (4\tau), \quad (4.131)$$

где D — диаметр трубопровода; p — давление сжатого воздуха; τ — предельное напряжение сопротивления сдвигу бетонной смеси по стенке трубы.

Расчеты показывают, что для жестких смесей с расходом цемента около 300 кг на 1 м³ бетона и В/Ц=0,6 транспортировка смеси

при давлении 0,6 МПа (обычное давление при порционной подаче) по трубопроводу диаметром 100 мм возможна не далее 5 м. Поскольку на производстве транспортировать смесь приходится на большие расстояния, то такой способ при малых давлениях для жестких смесей непригоден.

С точки зрения гидродинамики, характер движения жестких и пластичных бетонных смесей по трубопроводу также различен. Эпюра скоростей высокопластичных смесей, особенно при вибрации трубопровода, имеет выпуклый характер с неярко выраженным ядром малого радиуса, кривизна ее зависит от пластичности — чем она выше, тем более выпуклая эпюра. Жесткая бетонная смесь движется по трубе без взаимного перемещения слоев (за исключением пристеночной зоны, содержащей только растворную часть), как «твердое тело». При порционном режиме перемещение таких смесей по трубопроводу сжатым воздухом аналогично так называемому контейнерному пневмотранспорту. Поэтому в промышленности сборного железобетона трубопроводный транспорт бетонной смеси называют пневмотранспортом. Если для жестких смесей это в какой-то мере оправдано, то для высокопластичных смесей, обладающих всеми свойствами высоковязкой жидкости, такое название вряд ли приемлемо.

Глава 5. ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ

§ 5.1. Основы теплопередачи

Тепловыми называют процессы, скорость протекания которых определяется скоростью подвода или отвода теплоты.

В производстве искусственных строительных материалов тепловая обработка является необходимым переделом при изготовлении большинства видов изделий. Зачастую эта операция — конечная стадия технологической переработки, определяющая свойство материала и качество получаемых изделий. Как правило, тепловая обработка осложняется массообменными процессами.

Как уже указывалось, отнесение процесса, происходящего в аппарате или установке, к тому или иному классу определяется целенаправленностью процесса. Например, во время сушки удаляется влага, т. е. происходит массообменный процесс. Однако характер его протекания, изменения параметров процесса и даже его скорость во многом определяются законами теплопередачи, т. е. тепловыми процессами. Из таких наиболее распространенных тепловых процессов, как нагревание, охлаждение, конденсация и испарение, по существу, тепловыми являются только два первых, остальные же определяются не только законами переноса теплоты, но и законами массообмена.

Тепловая энергия передается от тел, имеющих более высокую температуру, телам с более низкой температурой. Совокупность значений температуры в данный момент для всех точек простран-

ства называется *температурным полем*. Если температура зависит от времени, то температурное поле называется *нестационарным*, в противном случае поле *стационарное*.

Геометрическое место точек, имеющих одинаковую температуру, образует изотермическую поверхность.

Если рассмотреть две изотермы (рис. 5.1) с температурой t° и $t^\circ + \Delta t^\circ$, то можно отметить, что наиболее резкое изменение температуры наблюдается в направлении нормали к изотермическим поверхностям. Предел отношения разности температур к расстоянию между изотермами по нормали Δx называется *температурным градиентом*

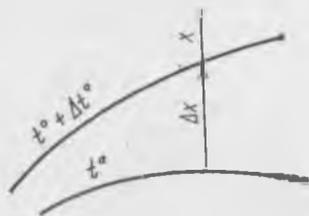


Рис. 5.1. К объяснению температурного градиента

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} (\Delta t^\circ / \Delta x) = dt^\circ / dx = \nabla t^\circ, \quad (5.1)$$

где ∇t° — градиент температур.

Положительное направление градиента температур считается в сторону возрастания температуры. Значение температурного градиента показывает, как быстро изменяется температура на данном отрезке пространства. Тепловая энергия распространяется всегда только в сторону областей с меньшей температурой. Количество переносимой теплоты за единицу времени называется *тепловым потоком*. Тепловой поток, отнесенный к единице поверхности, называется *плотностью теплового потока*. Направление теплового потока противоположно направлению температурного градиента.

Различают три способа передачи теплоты: теплопроводность, конвекция и тепловое излучение.

Теплопроводность. Теплопроводность, или кондукция, — процесс распространения теплоты путем непосредственного соприкосновения между частицами тела. Теплопроводностью передается теплота в газах, жидкостях и твердых телах.

Основной закон распространения теплоты теплопроводностью

$$q = -\lambda \nabla t^\circ, \quad (5.2)$$

где q — плотность теплового потока; λ — коэффициент теплопроводности.

Соотношение (5.2) выражает основной закон теплопроводности Фурье. Знак минус в правой части уравнения показывает, что направления теплового потока и температурного градиента противоположны. *Коэффициент теплопроводности* определяет собой количество теплоты, которое проходит в единицу времени через единицу поверхности при разности температур в 1° на единицу длины. Коэффициент теплопроводности является физическим параметром вещества и зависит от свойств тела: структуры, плотности, давления и температуры.

Общее количество теплоты Q , переданное теплопроводностью

для стационарного температурного поля через плоскую стенку толщиной δ с поверхностью A за время t при разности температур на наружных поверхностях стенки Δt° :

$$Q = qAt = \frac{\lambda}{\delta} \Delta t^\circ At; \quad (5.3)$$

то же, для плоской многослойной стенки

$$Q = qAt = \frac{\Delta t^\circ}{\sum_{i=1}^{i=n} \delta_i / \lambda_i} At,$$

то же, для цилиндрической многослойной поверхности

$$Q = \frac{\Delta t^\circ}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{l}{2\pi l \lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}} At,$$

где l — длина цилиндра; d — наружный диаметр.

Все вышеприведенные формулы справедливы для установившегося стационарного теплового режима. При нестационарном режиме количество переданной теплоты, а следовательно, и температурное поле изменяются во времени, т. е. происходит нагревание или охлаждение тел. В технике с этими процессами приходится встречаться постоянно. Например, при тепловлажностной обработке бетона распространение температуры от поверхности к центру изделия в период подъема температуры в окружающей среде — типичный нестационарный тепловой процесс, где распространение теплоты в теле бетона в основном происходит за счет теплопроводности.

Дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье в неподвижной среде

$$\partial t^\circ / \partial t = a \nabla^2 t^\circ, \quad (5.4)$$

где a — коэффициент температуропроводности, $a = \lambda / (c\rho)$; $\nabla^2 t^\circ$ — оператор Лапласа, $\nabla^2 t^\circ = d^2 t^\circ / dx^2 + d^2 t^\circ / dy^2 + d^2 t^\circ / dz^2$.

В частном случае при установившемся процессе температура не изменяется во времени и $dt^\circ / dt = 0$. При этом так как значение a не может быть равно нулю, то, следовательно, $\nabla^2 t^\circ = 0$ или

$$\partial^2 t^\circ / \partial x^2 + \partial^2 t^\circ / \partial y^2 + \partial^2 t^\circ / \partial z^2 = 0. \quad (5.5)$$

Уравнение (5.5) является дифференциальным уравнением теплопроводности в неподвижной среде при установившемся тепловом режиме.

Конвекция — процесс распространения теплоты перемещением частиц. Плотность теплового потока, передаваемого конвекцией, описывается уравнением Ньютона — Рихмана

$$q = \alpha \Delta t^\circ. \quad (5.6)$$

Коэффициент теплоотдачи α показывает, какое количество теплоты отдается единицей поверхности в окружающую среду в единицу времени при разности температур между теплоотдающим и тепловоспринимающим телом в 1° . Коэффициент теплоотдачи не является величиной постоянной и для одного и того же вещества может изменяться в очень больших пределах. На коэффициент теплоотдачи влияют: физические свойства жидкости или газа (вязкость, плотность, теплопроводность, теплоемкость); скорость движения жидкости или газа (с увеличением скорости движения α возрастает); характер движения жидкости или газа — ламинарное или турбулентное; форма омываемой поверхности; степень шероховатости поверхности и т. д.

Таким образом, коэффициент теплоотдачи в отличие от коэффициента теплопроводности не является физическим параметром жидкости или газа.

При изучении конвективного теплообмена основной задачей является определение коэффициента теплоотдачи. Определение его расчетными методами связано с большими трудностями, поэтому α находят обычно опытным путем. Постановка опытов, обобщение их результатов и выяснение возможностей приложения полученных закономерностей к другим аналогичным явлениям облегчаются положениями теории подобия.

Обычно α определяют через критерии подобия, которые получают из дифференциальных уравнений теплообмена, устанавливающих зависимость между параметрами процесса в дифференциальной форме.

Уравнение (5.6) справедливо для стационарных режимов. В инженерной практике чаще приходится иметь дело с нестационарными тепловыми процессами. Например, при тепловлажностной обработке бетона в период подъема температуры количество теплоты, переданного поверхности изделия от паровоздушной среды, постоянно изменяется, т. е. процесс конвективной передачи теплоты является нестационарным.

Дифференциальное уравнение конвективного теплообмена (уравнение Фурье — Кирхгофа)

$$\frac{\partial t^\circ}{\partial t} + \frac{\partial t^\circ}{\partial x} v_x + \frac{\partial t^\circ}{\partial y} v_y + \frac{\partial t^\circ}{\partial z} v_z = a \nabla^2 t^\circ. \quad (5.7)$$

Для установившегося процесса член $dt^\circ/dt=0$. Для твердых тел $v_x=v_y=v_z$ и уравнение превращается в дифференциальное уравнение теплопроводности.

Критерии теплового подобия можно получить, проведя подобные преобразования уравнения (5.7). В подобных преобразованиях знаки математических операторов могут быть отброшены, поэтому

$$\left(\frac{\partial t^\circ}{\partial x} v_x + \frac{\partial t^\circ}{\partial y} v_y + \frac{\partial t^\circ}{\partial z} v_z \right) \sim \frac{t^\circ}{l} v; \quad a \nabla^2 t^\circ \sim \frac{a t^\circ}{l^2}; \quad \frac{\partial t^\circ}{\partial t} \sim \frac{t^\circ}{t}.$$

Если в качестве масштаба сравнения принять количество теплоты, передаваемого теплопроводностью, то, разделив член t°/t на

at°/l^2 , получают безразмерный комплекс $l^2/(at)$. Обратную величину этого комплекса называют *критерием Фурье*:

$$Fo = at/l^2. \quad (5.8)$$

Необходимое условие подобия неустановившихся процессов теплообмена обеспечивается равенством критериев Фурье в сходственных точках тепловых потоков. Этот критерий является аналогом критерия Но при гидродинамическом подобии.

Критерий Пекле, являющийся мерой соотношения конвективной и кондуктивной составляющих при конвективном теплообмене, получают делением конвективного члена $t^{\circ}v/l$ на at°/l^2 :

$$Pe = vl/a. \quad (5.9)$$

Умножив числитель и знаменатель критерия Pe на v , можно выразить его через критерии Рейнольдса и Прандтля:

$$Pe = \frac{vl}{v} \frac{v}{a} = (vl\rho/\eta)(\eta c_p/\lambda) = Re Pr,$$

откуда

$$Pr = \eta c_p/\lambda. \quad (5.10)$$

Критерий Pr является мерой подобия полей температур и скоростей и характеризует подобие физических свойств теплоносителей при конвективном теплообмене. Передача теплоты в пограничном слое характеризуется уравнением: $-\lambda \nabla t^{\circ} = a(t^{\circ}_{ст} - t^{\circ}_{ж})$. Проведя подобные преобразования (отбросив знаки математических операторов), получим $-\lambda \nabla t^{\circ} \sim \lambda t^{\circ}/l$; $a(t^{\circ}_{ст} - t^{\circ}_{ж}) = a \Delta t^{\circ} \sim a t^{\circ}$, откуда *критерий Нуссельта*

$$Nu = at^{\circ}/(\lambda t^{\circ}/l) = al/\lambda. \quad (5.11)$$

Равенство критериев Нуссельта характеризует подобие процессов теплопереноса на границе между стенкой и потоком жидкости.

Поскольку конвективный теплообмен связан с движением жидкости, необходимыми условиями процессов переноса теплоты является соблюдение не только теплового, но и геометрического и гидродинамического подобий. Последнее, как известно (см. гл. 4), характеризуется равенством критериев Re , Fr , Ho , Γ .

Таким образом, обобщенное (критериальное) уравнение конвективного теплообмена имеет вид $f(Fo, Pr, Re, Nu, Fr, Ho, \Gamma) = 0^*$.

Поскольку искомый коэффициент теплоотдачи входит в критерий Нуссельта, он и является определяемым, т. е.

$$Nu = f'(Fo, Pr, Re, Fr, Ho, \Gamma). \quad (5.12)$$

При вынужденном движении жидкости, когда влияние критерия Fr исчезающе мало, в установившемся процессе теплообмена (отсутствие критериев Ho и Fo) обобщенное уравнение принимает вид

$$Nu = \psi(Re, Pr, \Gamma). \quad (5.13)$$

* В критериальном уравнении критерий Re выражен как $PrRe$.

При естественной конвекции критерий Fr исключать нельзя. Вследствие трудностей при определении скорости движения жидкости при естественной конвекции последний обычно заменяют производным критерием *Архимеда*, который равен

$$Ar = (gl^3/\nu^2)(\Delta\rho/\rho_0). \quad (5.14)$$

Так как $\Delta\rho = \rho_0(1 - \beta\Delta t^\circ) = \rho_0\beta\Delta t^\circ$, то, подставляя в критерий Ar вместо $\Delta\rho$ его значение, получают *критерий Грасгофа*:

$$Gr = gl^3\beta\Delta t^\circ/\nu^2, \quad (5.15)$$

где l — определяющий геометрический размер (например, высота стенки); β — коэффициент объемного расширения жидкости; Δt° — разность температур между жидкостью и стенкой.

Критерий Грасгофа есть мера отношения сил трения к подъемной силе.

Таким образом, при естественной конвекции или свободном движении жидкости обобщенное уравнение имеет вид

$$Nu = \Phi(Gr, Pr, \Gamma). \quad (5.16)$$

Лучистый теплообмен — процесс распространения теплоты в виде электромагнитных волн. Часть тепловой энергии тела превращается в лучистую энергию и в виде электромагнитных колебаний распространяется в пространстве со скоростью света. Встречая на своем пути твердые, жидкие или газообразные тела, тепловые лучи частично поглощаются, частично отражаются и в некоторых случаях частично проходят сквозь эти тела. Поглощенные лучи снова превращаются в тепловую энергию. Такое превращение энергии наблюдается непрерывно как для системы, в которой тела имеют различные температуры, так и для системы, где температура у всех тел одинакова. В этом случае количество излучаемой энергии равно поглощаемой, т. е. система находится в тепловом равновесии.

Общее количество теплоты, излучаемое поверхностью A в единицу времени, называют *лучистым тепловым потоком* Q . Величину лучистого теплового потока, отнесенную к единице поверхности, называют *поверхностной плотностью* лучистого теплового потока или *лучеиспускательной способностью* $\dot{E} = Q/A$.

Количество теплоты, переданного лучистым теплообменом

$$Q = \alpha_n \Delta t, \quad (5.17)$$

где α_n — коэффициент теплообмена излучением,

$$\alpha_n = \epsilon_n C_0 [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] / (T_1 - T_2), \quad (5.18)$$

здесь ϵ_n — приведенная степень черноты излучаемого и воспринимаемого излучение тел; C_0 — коэффициент излучения абсолютно черного тела; T_1 и T_2 — абсолютные температуры тел.

В технике в передаче теплоты, как правило, участвуют одновременно два или все три способа передачи теплоты — теплопроводность, конвекция и излучение.

Сложным теплообменом называют передачу теплоты одновременно несколькими способами. Теплообмен между горячей и холодной средой через разделительную твердую стенку является одним из наиболее важных и часто используемых в промышленности строительных материалов. Например, в многочисленных теплообменных устройствах основным рабочим процессом является процесс теплообмена между теплоносителями. Такой теплообмен называют теплопередачей.

Для примера рассмотрим однослойную стенку (рис. 5.2) толщиной δ . Теплопроводность материала стенки λ . Температуры сред, омывающих стенку слева и справа, t_1° и t_2° . Примем, что $t_1^\circ > t_2^\circ$. Тогда температуры поверхностей стенки будут соответственно $t_{\text{ст}1}^\circ > t_{\text{ст}2}^\circ$. Требуется определить плотность теплового потока q , проходящего через стенку от греющей среды к нагреваемой.

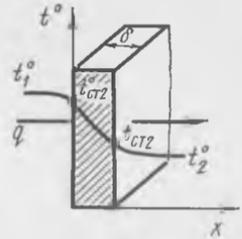


Рис. 5.2. Теплопередача через плоскую однородную стенку

Так как рассматриваемый процесс теплопередачи протекает при стационарном режиме, то теплота, отданная стенке первым теплоносителем (горячим), передается через нее второму теплоносителю (холодному). Пользуясь известными формулами, можно записать:

$$q = \alpha_1 (t_1^\circ - t_{\text{ст}1}^\circ);$$

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_{\text{ст}1}^\circ - t_{\text{ст}2}^\circ);$$

$$q = \alpha_2 (t_{\text{ст}2}^\circ - t_2^\circ).$$

Определим полный температурный напор $t_1^\circ - t_2^\circ$. Для этого из приведенных равенств определим сначала местные температурные напоры:

$$t_1^\circ - t_{\text{ст}2}^\circ = q (1/\alpha_1);$$

$$t_{\text{ст}1}^\circ - t_{\text{ст}2}^\circ = q (\delta/\lambda);$$

$$t_{\text{ст}2}^\circ - t_2^\circ = q (1/\alpha_2).$$

Складывая эти равенства, получим полный температурный напор $t_1^\circ - t_2^\circ = q (1/\alpha_1 + \delta/\lambda + 1/\alpha_2)$, откуда определим значение плотности теплового потока

$$q = (t_1^\circ - t_2^\circ) / (1/\alpha_1 + \delta/\lambda + 1/\alpha_2). \quad (5.19)$$

Знаменатель равенства (5.19) представляет собой сумму термических сопротивлений, которая состоит из термического сопротивления теплопроводности δ/λ и двух термических сопротивлений теплоотдачи $1/\alpha_1$ и $1/\alpha_2$. Введем обозначение

$$K = \frac{1}{1/\alpha_1 + \delta/\lambda + 1/\alpha_2}. \quad (5.20)$$

Из выражений (5.19) и (5.20) получим

$$q = K(t_1^{\circ} - t_2^{\circ}). \quad (5.21)$$

Величину K называют коэффициентом теплопередачи [Вт/(м² × °С)], а величину, обратную коэффициенту теплопередачи, называют полным термическим сопротивлением теплопередаче

$$R = 1/K = 1/\alpha_1 + \delta/\lambda + 1/\alpha_2. \quad (5.22)$$

Рассмотрим другой пример. При высокотемпературных тепловых процессах — обжиге, всучивании, получении расплавов и т. п. — теплота передается обрабатываемому материалу одновременно конвекцией и излучением. Если обозначить плотность теплового потока q , то $q_1 = q_k + q_{\text{л}}$, где q_k и $q_{\text{л}}$ — доля тепловых потоков, переданных конвекцией и излучением. При температуре газа $t_{\text{г}}^{\circ}$ и температуре материала $t_{\text{м}}$ можно записать:

$$q_k = \alpha_k(t_{\text{г}}^{\circ} - t_{\text{м}}^{\circ});$$

$$q_{\text{л}} = \varepsilon_n C_0 [(t_{\text{г}}^{\circ}/100)^4 - (t_{\text{м}}^{\circ}/100)^4] (t_{\text{г}}^{\circ} - t_{\text{м}}^{\circ}).$$

Тогда

$$q = \alpha_k(t_{\text{г}}^{\circ} - t_{\text{м}}^{\circ}) + \varepsilon_n C_0 [(t_{\text{г}}^{\circ}/100)^4 - (t_{\text{м}}^{\circ}/100)^4] = \alpha_{\text{общ}} \Delta t, \quad (5.23)$$

где Δt° — разность температур газа и материала, град; $\alpha_{\text{общ}}$ — суммарный, или эффективный, коэффициент теплоотдачи, $\alpha_{\text{общ}} = \alpha_k + \alpha_{\text{л}}$.

В рассмотренных примерах передача теплоты осуществлялась при стационарном режиме, однако большинству процессов, связанных с нагреванием и охлаждением материалов и изделий, сопутствует нестационарный теплообмен.

Задача распространения теплоты в условиях нестационарного режима не может быть решена аналитическим путем, поскольку невозможно найти функцию $t^{\circ} = f(x, y, z, t)$, которая одновременно удовлетворяла бы как дифференциальным уравнениям теплообмена, так и соответствующим условиям однозначности. Существуют лишь аналитические решения, выполненные при упрощающих допущениях. Но даже в этом случае решения настолько громоздки и сложны, что ими при инженерных расчетах практически не пользуются.

Применяемый для этих целей графоаналитический метод пригоден для тел простой формы — пластины, цилиндра, шара. Метод основан на том, что число переменных, от которых зависит изменяющаяся в пространстве и во времени температура, может быть сокращено объединением их в безразмерные критерии подобия.

В расчетах используют критерии Фурье — $Fo = at/l^2$; Био — $Bi = \alpha l/\lambda$; геометрический критерий — $\Gamma = x/l$, где x — расстояние от поверхности тела до расчетной точки; l — характеристический размер тела (например, для шара — его радиус).

Критерий Био характеризует подобие процессов нестационарной теплопроводности и постоянство отношения внутреннего термического сопротивления теплопроводности к внешнему термическому

сопротивлению теплоотдачи. Внешне он сходен с критерием Нуссельта. Величина λ в критерии Bi в отличие от критерия Nu — коэффициент теплопроводности твердого тела (в Nu — жидкости). Коэффициент теплоотдачи α в критерии Bi задается условиями однозначности.

Обычно в промышленности строительных материалов нестационарный режим сводится к решению задач, связанных с установлением температуры в определенных точках тела в заданный момент времени, к определению длительности процесса нагрева или остывания тела, определению количества теплоты, полученного или отданного телом в определенный промежуток времени.

Температуры поверхности ($t_{ст}^{\circ}$) и центра ($t_{ц}^{\circ}$) стенки определяют по уравнениям:

$$\theta_{ст}/\theta_0 = (t_{ст}^{\circ} - t_{ср}^{\circ}) / (t_0^{\circ} - t_{ср}^{\circ}) = f(Bi, Fo); \quad (5.24)$$

$$\theta_{ц}/\theta_0 = (t_{ц}^{\circ} - t_{ср}^{\circ}) / (t_0^{\circ} - t_{ср}^{\circ}) = \varphi(Bi, Fo). \quad (5.25)$$

Количество теплоты при нагреве или остывании стенки за время t вычисляют исходя из зависимости

$$\theta t / \theta_0 = \psi(Bi, Fo). \quad (5.26)$$

В приведенных уравнениях $\theta = t^{\circ} - t_{ср}^{\circ}$ — избыточная по отношению к температуре среды температура поверхности ($t_{ст}$) или центра ($t_{ц}$) стенки в данный момент времени t ; $\theta_0 = t_0^{\circ} - t_{ср}^{\circ}$ — избыточная температура поверхности или центра стенки в начальный момент времени, т. е. при $t=0$ и $t^{\circ} = t_0^{\circ}$; θ/θ_0 — безразмерная температура стенки, где θ — некоторая температура, принятая за масштаб температур; θ_0 — внутренняя теплота стенки в начальный момент времени (за начало отсчета принята внутренняя теплота стенки при температуре, равной температуре окружающей среды).

Для определения $t_{ст}^{\circ}$, $t_{ц}^{\circ}$ и θt сначала находят $\theta_{ст}/\theta_0$; $\theta_{ц}/\theta_0$ и $\theta t/\theta_0$ по вычисленным критериям Bi и Fo , пользуясь графиками или таблицами, имеющимися в справочной литературе. Затем по формулам (5.24...5.26) с известными начальными значениями t_0° , $t_{ср}^{\circ}$ и θ_0 вычисляют искомые величины.

§ 5.2. Теплообмен при изменении агрегатного состояния

В процессе теплообмена нагреваемые или охлаждаемые материалы часто изменяют агрегатное состояние: испаряются, конденсируются, плавятся или кристаллизуются. Особенность таких процессов теплообмена заключается в том, что теплота подводится к материалам или отводится от них при постоянной температуре и распространяется не в одной, а в двух фазах. Эти особенности теплоотдачи при изменении агрегатного состояния могут быть учтены путем введения в критериальные уравнения конвективного переноса теплоты дополнительного критерия, учитывающего теплоту изменения агрегатного состояния.

Рассмотрим процесс теплообмена при конденсации пара. Выберем на поверхности раздела жидкой и паровой фаз элементарную площадку dA . Пар, непрерывно конденсируясь, переходит в жидкую фазу. Обозначим линейную скорость жидкости, образующейся при конденсации пара и протекающей через выбранную элементарную площадку, через v , плотность этой жидкости ρ и теплоту парообразования r . Очевидно, что количество теплоты, передаваемое жидкости от пара при его конденсации через площадку в течение 1 ч. составит $dQ = r\rho v dA$.

Это количество теплоты отводится от площадки dA в массу жидкости теплопроводностью и может быть определено на основании закона Фурье как $dQ = -\lambda(dt^\circ/dx)dA$.

Сопоставление двух последних равенств дает

$$\lambda dt^\circ/dx = r\rho v \text{ или } dt^\circ/dx = r\rho v/\lambda.$$

Заменяя в последнем равенстве отношение λ/ρ произведением коэффициента температуропроводности жидкости a на ее теплоемкость c , получаем уравнение, характеризующее условия на границе раздела фаз при изменении агрегатного состояния: $dt^\circ/dx = rv/(ca)$. При делении правой части этого уравнения на левую получим безразмерный комплекс дифференцирования и направления (заменяв x на неориентированный в определенном направлении линейный размер l), получаем критерий $rvl/(cat^\circ)$.

Этот критерий представляется в виде произведения двух безразмерных комплексов (критериев), причем в первом комплексе температуру t° заменяют некоторой разностью температур Δt° , т. е.

$$[r/(c\Delta t^\circ)](vl/a) = K \text{ Pe.} \quad (5.27)$$

В равенстве (5.27) символ

$$K = r/(c\Delta t^\circ) \quad (5.28)$$

является новым критерием теплового подобия при изменении агрегатного состояния. Величина Δt° представляет собой разность между температурой фазового превращения и температурой одной из фаз, а произведение $c\Delta t^\circ$ является теплотой перегрева или переохлаждения рассматриваемой зоны относительно температуры фазового превращения. Критерий K служит мерой отношения теплоты, идущей на изменение агрегатного состояния вещества к теплоте перегрева или переохлаждения одной из фаз относительно температуры фазового превращения. Он характеризует относительное изменение количества протекающей жидкости вследствие изменения агрегатного состояния на границе раздела фаз.

Из различных случаев теплообмена при изменении агрегатного состояния наибольшее значение для процессов технологии строительных материалов имеют теплообмен при конденсации паров, теплообмен при плавлении и растворении и реже теплоотдача при кипении жидкостей.

Теплоотдачу при конденсации паров рассчитывают как на основе теории подобия, так и на основе гидродинамического и теплового анализов процесса конденсации. Эти методы дают одинаковые результаты при одинаковой схеме процесса.

Наиболее удовлетворительной следует признать схему Нуссельта, согласно которой на поверхности твердого тела, воспринимающего теплоту от пара, происходит пленочная конденсация при отсутствии капельной конденсации*. Пленка жидкости, образующаяся на поверхности твердого тела, представляет собой основное термическое сопротивление распространению теплоты от пара к твердому телу. Эта пленка стекает с тела и по мере движения книзу утолщается в результате конденсации пара по всей поверхности твердого тела. Анализ этого процесса на основе теории подобия дает возможность установить следующую критериальную зависимость:

$$\text{Nu} = f(\text{Pr}, K, \text{Ga}), \quad (5.29)$$

где $\text{Ga} = g l^3 / \nu^2$ — критерий Галилея.

В результате гидродинамического и теплового анализов процесса пленочной конденсации пара, а также представления опытных данных в виде критериальной зависимости (5.29) получена формула

$$\text{Nu} = C(\text{Pr} K \text{Ga})^{0,25} \quad (5.30)$$

или

$$\alpha = C \sqrt[4]{\lambda^3 g \rho^2 r / (H \Delta t^\circ \eta)}, \quad (5.31)$$

где α — коэффициент теплоотдачи; C — коэффициент, $C = 0,94$ для случая конденсации пара на вертикальной стенке (или трубе) и $C = 0,72$ для конденсации пара на горизонтальной трубе; λ , ρ и η — соответственно коэффициент теплопроводности, плотность и вязкость конденсата, определяемые при средней температуре пленки $t = 0,5(t_s^\circ + t_v^\circ)$; t_s° — температура насыщения пара; t_v° — температура стенки; $\Delta t^\circ = t_s^\circ - t_v^\circ$; r — теплота парообразования при температуре насыщения; H — определяющий размер (при конденсации на вертикальной стенке — высота стенки, при конденсации на горизонтальной трубе — диаметр трубы).

Теплоотдача при конденсации паров зависит при прочих равных условиях от скорости и направления течения паров, состояния поверхности конденсации, состава паров и их перегрева.

Приведенные формулы получены для случая конденсации неподвижного пара. Для движущегося пара значение коэффициента теплоотдачи может быть больше или меньше по сравнению с неподвижным. Коэффициент теплоотдачи увеличивается со скоростью движения пара, если поток его уменьшает толщину пленки конден-

* В промышленных аппаратах в подавляющем большинстве случаев происходит пленочная конденсация паров, однако искусственно могут быть созданы условия и для капельной конденсации, при которой теплоотдача в 10 ... 20 раз интенсивнее, чем при пленочной.

сата или срывает ее. Если же поток пара препятствует движению пленки и при этом не срывает ее, то увеличение скорости пара приводит к уменьшению коэффициента теплоотдачи. При шероховатых поверхностях коэффициенты теплоотдачи меньше, чем при гладких, так как их сопротивление течению жидкой пленки больше и потому меньше скорость стекания пленки и больше ее толщина.

Теплоотдача при конденсации паров, содержащих газы, менее интенсивна, чем теплоотдача при конденсации чистых паров. Содержание в водяном паре 1% воздуха уменьшает коэффициент теплоотдачи на 60%, а содержание 3% воздуха — на 80. Дальнейшее увеличение примесей воздуха в меньшей мере влияет на коэффициент теплоотдачи. Указанное явление объясняется тем, что при конденсации паров, содержащих инертные газы, возникает дополнительное термическое сопротивление, оказываемое инертными газами, скапливающимися у поверхности пленки.

Теплоотдача при кипении жидкостей относится к числу особенно сложных процессов, поэтому до последнего времени никому из исследователей не удалось сделать теоретических обобщений, позволяющих вычислять коэффициенты теплоотдачи.

При кипении пар образуется в виде пузырьков в определенных местах (центрах) поверхности нагрева.

При хорошей смачиваемости жидкостью поверхности нагрева (на рис. 5.3, а при небольшом угле θ) жидкость подтекает под пузырьки и облегчает их отрыв от поверхности нагрева. При плохой смачиваемости пузырьки пара имеют широкое основание и достигают при отрыве больших размеров (на рис. 5.3, б при большом угле θ); фактически отрывает-

Рис. 5.3. Форма паровых пузырьков на смачиваемой (а) и несмачиваемой (б) поверхностях

ся только верхушка пузырька, а у поверхности нагрева все время имеется паровая прослойка. При большом числе центров парообразования поверхность нагрева может покрываться сплошной паровой пленкой. В этом случае из-за плохой теплопроводности пара коэффициенты теплоотдачи имеют малые значения. Таким образом, при кипении жидкостей, плохо смачивающих поверхность нагрева, коэффициенты теплоотдачи значительно меньше, чем при кипении жидкостей, хорошо смачивающих поверхность нагрева.

Измерение температуры в объеме кипящей жидкости указывает на следующий характер температурного поля. Непосредственно у поверхности нагрева жидкость имеет температуру, равную температуре этой поверхности. На расстоянии 2...3 мм от поверхности нагрева температура жидкости резко уменьшается до значения, превышающего на 0,3...0,5°C температуру образующегося пара. Эта температура сохраняется практически во всем объеме жидкости, т. е. жидкость в основной массе незначительно перегрета.

Отрывающийся от поверхности нагрева пузырек пара имеет в момент отрыва диаметр d_0 , обусловленный лишь поверхностным натяжением жидкости σ , краевым углом смачивания и плотностями жидкости ($\rho_{ж}$) и пара ($\rho_{п}$)

$$d_0 = 0,020 \sqrt{\sigma / (\rho_{ж} \rho_{п})}. \quad (5.32)$$

Расчет по этой формуле, выведенной на основе теории капиллярности, показывает, что пузырьки водяного пара, отрывающиеся от поверхности нагрева при кипении воды при атмосферном давлении, имеют диаметр 2...3 мм. По мере продвижения вверх через слой жидкости пузырек пара значительно увеличивается в объеме. Это свидетельствует о том, что пузырек пара при движении через слой жидкости получает от нее дополнительное количество пара и теплоты. Обычно объем пузырька при движении вверх увеличивается в несколько десятков раз, а значит, основное количество теплоты воспринимается пузырьком не от поверхности нагрева, а от жидкости. Таким образом, из рассмотрения механизма парообразования при кипении жидкостей следует, что теплота передается от поверхности нагрева к жидкости, а от жидкости — к пузырькам пара, а затем вместе с ними переносится в паровую фазу.

Число центров образования паровых пузырей и частота их отрыва и, следовательно, интенсивность теплоотдачи при кипении зависит от перепада температур Δt° поверхности нагрева и кипящей жидкости. Как видно из графика рис. 5.4, коэффициент теплоотдачи увеличивается с ростом разности температур лишь до определенного предела, выше которого α резко уменьшается с увеличением Δt° . Разность температур, соответствующая максимальному значению коэффициента теплоотдачи, называется *критической разностью температур*. При рассмотрении функциональной зависимости $\alpha = f(\Delta t^\circ)$ для воды, кипящей в большом объеме, видно, что при значениях Δt° до 5°С и соответственно удельных тепловых нагрузках до 1000 Вт/(м²·ч) наблюдается плавный рост α при возрастании Δt° и теплоотдача обуславливается в основном естественной конвекцией. При дальнейшем увеличении Δt° и q число центров парообразования на поверхности нагрева растет, что приводит к возрастанию α . При критической и большей разности температур поверхность нагрева покрывается сплошной пленкой пара и коэффициент теплоотдачи резко уменьшается.

Кипение при наличии сплошной пленки пара на поверхности нагрева называется пленочным в отличие от кипения с парообразованием лишь в отдельных центрах, которое называют пузырьковым или ядерным.

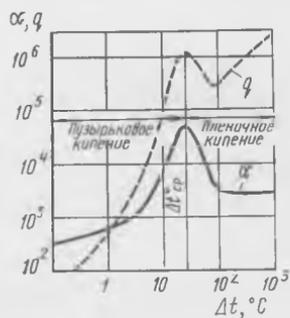


Рис. 5.4. Величина тепловых потоков и коэффициентов теплоотдачи в зависимости от разности температур жидкости и поверхности нагрева

Критическая разность температур зависит от природы кипящей жидкости, температуры, давления и характера поверхности нагрева. Так, для воды, кипящей при атмосферном давлении, критическая разность температур составляет $\sim 25^\circ\text{C}$, для бензола $\sim 40^\circ\text{C}$ и т. д. Рабочие разности температур при осуществлении процессов кипения не должны превышать критических.

По данным опытов с кипящей водой в интервале абсолютных давлений 1...22,5 МПа и с другими жидкостями С. С. Кутателадзе предлагает формулу для определения коэффициента теплоотдачи при пузырьковом кипении жидкости на чистой поверхности, погруженной в большой объем:

$$\alpha = 0,44\lambda \left(\frac{v_{ж} - v_{п}}{a} \right)^{0,5} \left(\frac{v}{a} \right)^{0,35} \left(\frac{q\rho}{3600r v_{п} g \eta} \frac{v_{ж}}{v_{ж} - v_{п}} \right)^{0,7}, \quad (5.33)$$

где p — абсолютное давление над поверхностью нагрева.

В практических расчетах пользоваться этим уравнением часто невозможно из-за отсутствия необходимых физических параметров жидкости и пара при температуре кипения. Поэтому для расчетов применяют найденные опытным путем зависимости вида

$$\alpha = A p^n q^m, \quad (5.34)$$

где A , n и m — константы, которые находят по справочникам; p — давление; q — удельный тепловой поток.

Теплообмен при кристаллизации из расплава заключается в следующем. Пусть скрытая теплота кристаллизации равна $r_{кр}$ и температура фазового превращения равна $t_{кр}^{\circ}$. Предположим, что в начальный момент вся масса расплава имела температуру $t_0^{\circ} > t_{кр}^{\circ}$. При снижении температуры расплава до $t_{кр}^{\circ}$ происходит отверждение поверхностного слоя и процесс начинает распространяться в глубину. Выделяющаяся теплота отводится с поверхности теплопроводностью. С некоторого момента скорость выделения теплоты фазовых превращений становится выше скорости ее отвода от поверхности все увеличивающейся толщины затвердевшей части расплава.

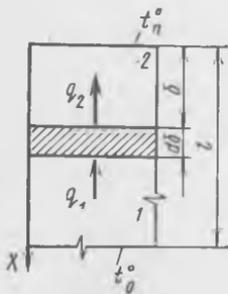


Рис. 5.5. Охлаждение расплава при фазовых превращениях:

1 — зона до фазового превращения; 2 — зона после фазового превращения

Возросшее термическое сопротивление этого слоя уже не обеспечивает отвод теплоты с необходимой скоростью. В результате процесс фазового превращения локализуется в узкой зоне поверхности (фронта) превращения. В дальнейшем скорость охлаждения расплава до $t_{кр}^{\circ}$ будет ограничиваться скоростью движения фронта превращения вещества. Скорость движения фронта тем ниже, чем больше скрытая теплота фазового перехода и чем меньше времени требуется для формирования этого фронта.

В некоторый момент времени положение фронта превращения определяется координатой δ (рис. 5.5). За время dt фронт перемес-

тяться на расстояние $d\delta$. При этом на единице поверхности фронта затвердевает масса вещества $\rho d\delta$ и выделяется теплота в количестве $\rho r_{пл} d\delta = q_{фронта}$. Удельную тепловую мощность фронта превращения подсчитывают по уравнению

$$q_{фронта} dt = \rho r_{пл} d\delta \quad (5.35)$$

или

$$q_{фронта} = \rho r_{пл} d\delta/dt, \quad (5.36)$$

где $d\delta/dt$ — скорость продвижения фронта.

Уравнение теплового баланса на фронте превращения имеет вид

$$q_2 = q_1 + q_{фронта} \quad \text{или} \quad -\lambda \frac{\partial t_2^\circ}{\partial x} = -\lambda \frac{\partial t_1^\circ}{\partial x} + \rho r_{пл} \frac{d\delta}{dt}. \quad (5.37)$$

Распределение температур в твердом теле и расплаве описывается дифференциальными уравнениями теплопроводности для одномерного температурного поля:

$$\frac{\partial t_0^\circ}{\partial t} = a_1 \frac{\partial^2 t_1^\circ}{\partial x^2} \quad \text{для} \quad \delta < x < l; \quad (5.38)$$

$$\frac{\partial t_2^\circ}{\partial t} = a_2 \frac{\partial^2 t_2^\circ}{\partial x^2} \quad \text{для} \quad 0 < x < \delta. \quad (5.39)$$

При граничных условиях $x=0$; $t^\circ = t_n^\circ$; $t=0$ и $t^\circ = t_0^\circ$ задача сводится к решению уравнений (5.38) и (5.39) с приведенными выше граничными условиями поверхности и на границе фронта по формуле (5.37).

Приближенное решение этой задачи (с точностью 15...20%) сводится к принятию допущений: $t_1^\circ = t_{пл}^\circ = \text{const}$, изменение температуры линейно, т. е. режим стационарный. Тогда полное время развития процесса на глубину l составит:

$$t = l^2 \rho r_{пл} / [2\lambda_2 (t_{уп}^\circ - t_n^\circ)]. \quad (5.40)$$

Теплообмен при растворении связан с изменением свободной энергии системы, которое сопровождается тепловым эффектом. Тепловой эффект растворения является результатом одновременно протекающих двух стадий процесса — разрушения кристаллического вещества на ионы и стадии гидратации (сольватации) ионов.

Согласно закону Гесса, тепловой эффект не зависит от пути протекания процесса, а определяется начальными и конечными состояниями системы, т. е. в данном случае

$$\Delta r_p = E - \Delta r_r, \quad (5.41)$$

где E — внутренняя энергия решетки; Δr_p — теплота растворения; Δr_r — теплота гидратации.

Из уравнения (5.41) следует, что при $E > \Delta r_2$ и $\Delta r_p > 0$ процесс идет с поглощением теплоты, а при $E < \Delta r_2$ и $\Delta r_p < 0$ система выделяет дополнительную теплоту.

Изменение температуры

$$t_1^\circ - t_0^\circ = \frac{m \Delta r_p}{V c_p \rho}, \quad (5.42)$$

где t_1° — температура раствора после полного растворения кристаллов; t_0° — температура растворителя до растворения; m — масса растворенного вещества; V — объем раствора; c_p и ρ — соответственно удельная теплоемкость и плотность раствора.

Теплообмен при кристаллизации из расплавов, протекающий за счет испарения растворителя при наличии внешних источников теплоты, может быть определен по уравнению Шевандина:

$$Nu = Nu_0 \exp(t/\theta_T), \quad (5.43)$$

где Nu_0 — критерий Нуссельта в начале роста кристаллов; θ_T — постоянная времени процесса теплообмена, получаемая опытным путем.

§ 5.3. Внешний и внутренний теплообмен

В практике тепловых процессов при производстве строительных материалов обычно рассматривают два случая теплообмена: теплообмен между окружающей средой и нагреваемым или охлаждаемым материалом — внешний теплообмен и теплообмен между центральной зоной материала или изделия и его поверхностью — внутренний теплообмен.

При внешнем теплообмене возможны два случая протекания процесса — теплообмен непосредственно между теплоносителем (или хладагентом в случае охлаждения) и поверхностью материала и теплообмен между теплоносителем и материалом через пленку сконденсировавшейся на поверхности материала влаги. Первый случай характерен для процессов сушки или обжига материала, второй — для пропаривания материала в среде насыщенного водяного пара.

Внешний теплообмен между теплоносителем и материалом происходит конвекцией, излучением и теплопроводностью.

Рассмотрим первый случай. В сушильных установках, где температура редко превышает 200°C , теплообмен излучением незначителен, поэтому для определения внешнего теплообмена можно использовать уравнение Ньютона для конвективного теплообмена. Тогда поток теплоты от теплоносителя к материалу

$$q = \alpha (t_T^\circ - t_{п.м}^\circ),$$

где α — коэффициент теплоотдачи от теплоносителя к поверхности материала; t_T° — средняя температура теплоносителя; $t_{п.м}^\circ$ — средняя температура поверхности материала.

В печных установках и при сушке материала при повышенных температурах (например, сушка песка в барабанных сушилках при непосредственном сжигании топлива в барабане), когда доля лучи-

стого теплообмена значительно возрастает, внешний теплообмен можно рассчитать по этой же формуле, однако коэффициент теплоотдачи α будет являться суммой двух составляющих: лучистого $\alpha_{\text{л}}$ и конвективного $\alpha_{\text{к}}$.

При отсутствии эндотермических реакций вычисленный по уравнению Ньютона поток теплоты расходуется на нагрев материала и влаги, находящейся в материале, и на ее испарение с поверхности материала.

Тогда балансовое уравнение при внешнем теплообмене

$$\alpha(t_{\text{г}}^{\circ} - t_{\text{н,м}}^{\circ}) = r\rho_0 R_v du/dt + c\rho_0 R_v dt^{\circ}/dt, \quad (5.44)$$

где r — теплота испарения; ρ_0 — плотность сухого материала; R_v — отношение объема сухого материала к его поверхности, с которой происходит испарение (характеристический размер тела); du/dt — скорость испарения; c — удельная теплоемкость материала; dt°/dt — скорость нагрева материала.

В приведенном уравнении первый член правой части учитывает расход теплоты на испарение влаги, второй — на нагрев материала. При отсутствии влаги в материале первый член правой части обращается в нуль и балансовое уравнение внешнего теплообмена (если эндотермические реакции отсутствуют) примет вид

$$\alpha(t_{\text{г}}^{\circ} - t_{\text{н,м}}^{\circ}) = c\rho_0 R_v dt^{\circ}/dt. \quad (5.45)$$

При тепловлажностной обработке на поверхности материала, находящегося в установке, может происходить конденсация пара. Это наблюдается, если температура поверхности материала меньше температуры окружающей среды и меньше температуры точки росы. При отсутствии конденсации внешний тепловой поток может быть подсчитан по приведенным выше уравнениям.

В случае теплообмена между теплоносителем и материалом через пленку сконденсировавшейся влаги процесс несколько усложняется. В зависимости от свойств поверхности тела при полном смачивании поверхности происходит пленочная конденсация, при частичном смачивании — капельная конденсация. В технологических установках среда является не чисто паровой, а паровоздушной.

Процесс конденсации пара, находящегося в смеси с воздухом, осложняется диффузионным переносом пара к поверхности конденсации (см. гл. 6). Вместе с паром к поверхности конденсации поступает воздух, понижающий парциальное давление пара. Парциальное давление смеси ($P_{\text{см}}$) будет складываться из суммы парциального давления сухого воздуха и парциального давления пара. Можно записать

$$P_{\text{см}} = P_{\text{в}}' + P_{\text{п}}' = P_{\text{в}}'' + P_{\text{п}}'', \quad (5.46)$$

где $P_{\text{п}}'$ и $P_{\text{п}}''$ — парциальное давление пара соответственно в окружающей среде и у поверхности материала; $P_{\text{в}}'$ и $P_{\text{в}}''$ — то же, сухого воздуха.

Если обозначить (рис. 5.6) через λ — коэффициент теплопроводности сконденсировавшейся пленки жидкости толщиной δ , $t_{ж}$ — температуру наружной поверхности пленки, $t_{м}$ — температуру поверхности материала, то на основании закона Фурье поток теплоты к материалу через пленку жидкости $q_{т} = \lambda(t_{ж}^{\circ} - t_{м}^{\circ})/\delta$. Этот суммарный поток теплоты складывается из потока теплоты от пленки сконденсировавшегося пара $q_{т.п}$ и потока теплоты от паровоздушной смеси $q_{т.см}$.

Удельный поток конденсирующегося пара

$$q_{п} = a_{п} \frac{m_{п}}{RT} (P'_{п} - P''_{п}), \quad (5.47)$$

Рис. 5.6. Пленочная конденсация влаги на поверхности материала

где $a_{п}$ — коэффициент массоотдачи пара; $m_{п}$ — масса пара; R — универсальная газовая постоянная.

Тогда удельный поток теплоты будет равен произведению удельного потока массы на теплоту парообразования:

$$q_{т.п} = r a_{п} \frac{m_{п}}{RT} (P'_{п} - P''_{п}). \quad (5.48)$$

Поток теплоты от паровоздушной смеси определяется уравнением Ньютона $q_{т.см} = \alpha_{см}(t'_{см} - t'_{ж})$. Тогда балансовое уравнение внешнего теплообмена при наличии пленки конденсата

$$\frac{\lambda}{\delta} (t'_{ж} - t'_{м}) = a_{п} r \frac{m_{п}}{RT} (P'_{п} - P''_{п}) + \alpha_{см} (t'_{см} - t'_{ж}). \quad (5.49)$$

В этом уравнении левая часть определяет поток теплоты, получаемый материалом; первый член правой части — поток теплоты, получаемый материалом за счет конденсации пара, второй член — поток теплоты, получаемый материалом за счет теплообмена с паровоздушной смесью.

При внутреннем теплообмене исходят из того, что поверхность нагреваемого тела получает теплоту в количестве, определяемом формулами Фурье или Ньютона, которое и распространяется внутри материала. Процесс распространения теплоты в теле в общем случае складывается из потока теплоты, распространяемого за счет теплопроводности материала (уравнение Фурье) и за счет потока движущейся внутри материала массы влаги. Последний определяется произведением массы движущейся влаги на ее теплосодержание.

Таким образом, для внутреннего теплопереноса можно записать

$$q = -\lambda \nabla t' + i' q_m, \quad (5.50)$$

где q — плотность суммарного потока теплоты; λ — коэффициент теплопроводности материала; $\nabla t'$ — градиент температур, равный dt'/dx ; i' — теплосодержание (энтальпия) влаги, перемещающейся в

материале; q_m — плотность суммарного потока влаги, перемещающегося в материале (см. в гл. 6).

При рассмотрении внутреннего теплообмена сухого материала второй член уравнения обращается в нуль и процесс теплообмена описывается уравнением Фурье.

§ 5.4. Движущая сила тепловых процессов

Движущей силой тепловых процессов является разность температур сред, при наличии которой теплота распространяется от среды с большей температурой к среде с меньшей температурой. Эта разность температур носит название *температурного напора*. При теплопередаче от теплоносителя к нагреваемому материалу разность между температурой теплоносителя и материала не сохраняет постоянного значения вдоль поверхности теплообмена и поэтому в тепловых расчетах, где применяется основное уравнение теплопередачи к конечной поверхности теплообмена, необходимо пользоваться средней разностью температур.

На рис. 5.7 показан характер изменения температур теплоносителя при различной организации движения его вдоль поверхности теплообмена. Теплоноситель охлаждается от t_1'' до t_1' , а материал

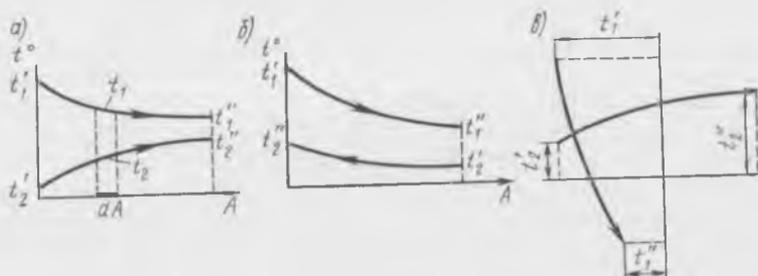


Рис. 5.7. Характер изменения температур теплоносителя и материала в зависимости от организации их взаимного перемещения:

а — прямоток; б — противоток; в — перекрестный ток

нагревается от t_2'' до t_2' . Количество теплоты, переданное от теплоносителя к материалу на произвольно выделенном элементе теплообменной поверхности (рис. 5.7, а), можно определить по основному уравнению теплопередачи

$$dQ = K (t_1'' - t_2'') dA dt, \quad (5.51)$$

где K — коэффициент теплопередачи; t_1'' и t_2'' — соответственно температуры теплоносителя и материала на элементе dA .

В результате теплообмена у элемента поверхности температура теплоносителя в единицу времени понизится на $dt_1'' = -dQ/(m_1 c_1)$, а температура материала повысится на $dt_2'' = +dQ/(m_2 c_2)$, где

m_1 и m_2 — соответственно масса теплоносителя и материала; c_1 и c_2 — их теплоемкости.

Вычитая второе равенство из первого, получаем

$$d(t_1^\circ - t_2^\circ) = -dQ [1/(m_1 c_1) - 1/(m_2 c_2)].$$

Подставляя значение dQ из основного уравнения в полученное равенство и проводя преобразования, имеем

$$d(t_1^\circ - t_2^\circ)/(t_1^\circ - t_2^\circ) = -K [1/(m_1 c_1) + 1/(m_2 c_2)] dA. \quad (5.52)$$

Если обозначить через Q общее количество теплоты, переданное в единицу времени от теплоносителя к материалу на всей теплообменной поверхности A , то из уравнения теплового баланса можно получить

$$Q = m_1 c_1 (t_1' - t_1'');$$

$$Q = m_2 c_2 (t_2'' - t_2').$$

Подставляя значения $m_1 c_1$ и $m_2 c_2$ из предыдущих уравнений в равенство (5.52), имеем

$$\frac{d(t_1^\circ - t_2^\circ)}{t_1^\circ - t_2^\circ} = -\frac{K}{Q} [(t_1' - t_1'') + (t_2'' - t_2')] dA.$$

В результате интегрирования этого уравнения при постоянном K получаем

$$Q = KA \frac{(t_1' - t_2') - (t_1'' - t_2'')}{2,3 \lg (t_1' - t_2')/(t_1'' - t_2'')}. \quad (5.53)$$

Если обозначить наибольшую разность температур между теплоносителем и материалом через $\Delta t_6^\circ = t_1' - t_2'$ и наименьшую $\Delta t_m = t_1'' - t_2''$, то соотношение (5.53) может быть представлено в следующем виде:

$$Q = KA \frac{\Delta t_6^\circ - \Delta t_m^\circ}{2,3 \lg (t_1' - t_2')/(t_1'' - t_2'')}. \quad (5.54)$$

В уравнении (5.51) разность температур $t_1 - t_2$ в данном случае представляет среднюю разность температуры теплоносителя и материала Δt_m° . Тогда на основании (5.51) и (5.54) можно получить соотношение для определения средней разности температур:

$$\Delta t_m^\circ = \frac{\Delta t_6^\circ - \Delta t_m^\circ}{2,3 \lg \Delta t_6^\circ / (\Delta t_m^\circ)}. \quad (5.55)$$

Это соотношение справедливо также и для противоточного движения теплоносителя вдоль поверхности теплообмена.

При небольших изменениях температур теплоносителя и мате-

риала, когда $\Delta t_m^\circ / \Delta t_6^\circ \geq 0,5$, среднюю разность температур можно вычислять как среднеарифметическую:

$$\Delta t_m^\circ = (\Delta t_6^\circ + \Delta t_m^\circ) / 2, \quad (5.56)$$

при этом ошибка не превышает 4%.

При перекрестном потоке теплоносителя и материала среднюю разность температур можно вычислять по формуле (5.55) с поправочным коэффициентом $\varepsilon_{\Delta t^\circ}$:

$$\Delta t_m^\circ = \varepsilon_{\Delta t^\circ} \frac{\Delta t_6^\circ - \Delta t_m^\circ}{2,3 \lg \Delta t_6^\circ / (\Delta t_m)} \quad (5.57)$$

Коэффициент $\varepsilon_{\Delta t^\circ}$ находят по графикам в зависимости от соотношения температур теплоносителя и материала.

Правильный выбор взаимного движения теплоносителя и материала имеет существенное значение для экономичности проведения процессов теплообмена.

Разберем следующий пример. Пусть в каком-либо тепловом аппарате происходит обработка материала. Максимальная температура в аппарате, а следовательно, и максимальная температура теплоносителя определяется свойствами материала и не должна превышать t_1^f . Начальная температура материала t_2^f . Поскольку потери теплоты через ограждения установки определяются температурами теплоносителя, то они в случаях прямотока и противотока будут одинаковыми.

При прямотоке материал с той же начальной температурой, что и при противотоке, в конце процесса может нагреться до более высокой температуры t_2° (см. рис. 5.7). Из уравнения материального баланса (см. гл. 1) при данных условиях следует, что разница в расходах теплоты на процесс будет определяться только потерями теплоты с отходящим материалом. Так как при противотоке эти потери выше и больше температура отходящего материала, то и расход теплоты на обработку материала при противотоке выше, чем при прямотоке. Отсюда следует, что с точки зрения расходов теплоты прямоток выгоднее, чем противоток.

Однако в промышленности строительных материалов противоток применяют значительно чаще, чем прямоток. Происходит это по следующим соображениям: во-первых, большинство материалов, подвергаемых тепловой обработке, имеют малую прочность и не допускают больших перепадов температур между теплоносителем и материалом; во-вторых, при противотоке средняя разность температур, подсчитанная по формуле (5.55), больше, чем при прямотоке, и, следовательно, больше скорость теплообмена. Отсюда следует, что время на обработку материала при прочих равных условиях при противотоке может быть меньше, чем при прямотоке. Поэтому при выборе схемы подачи теплоносителя следует исходить не только из экономичности теплового процесса как такового, но и учитывать потери от брака продукции и возможный выигрыш в производительности установки.

§ 5.5. Классификация установок для тепловой обработки строительных материалов

Большинство строительных материалов и изделий нельзя получить без их предварительной тепловой обработки. Воздействию теплоты подвергаются как сами материалы, представляющие смесь различных компонентов, так и сырьевые материалы, предназначенные для получения определенных композиций. Температурная обработка производится в специальных аппаратах или установках, называемых тепловыми.

Единой классификации тепловых установок нет. Наиболее широкое распространение получила классификация таких установок, основанная на назначении определенного технологического периода. По этому принципу тепловые установки классифицируют на сушильные, печные, тепловлажностные, плавильные.

Сушильными называют *установки*, в которых тепловые процессы связаны с удалением влаги, химически не связанной с материалом. Такая влага обычно удаляется при сравнительно невысоких температурах, изменяя как технологические свойства материала, так и теплофизические свойства его. Как правило, в результате сушки повышается прочность материала, изменяется его коэффициент тепло- и температуропроводности. В некоторых производствах сушка совмещается с полимеризацией органических вяжущих. Сушильные установки по виду обрабатываемого материала подразделяются на установки для сушки сыпучих и кусковых материалов и на сушилки для штучных изделий. Для первого типа сушилок наибольшее распространение в промышленности строительных материалов получили барабанные и распылительные сушилки, сушилки с кипящим слоем и для сушки материала во взвешенном состоянии (рис. 5.8). Из распылительных наиболее распространены конвейерные, туннельные и камерные сушилки.

Печными называют *установки*, в которых при относительно высокой температуре в обжигаемом материале протекают физико-химические процессы, изменяющие химический состав и свойства исходного материала. Печные установки по виду обжигаемого продукта подразделяются на печи для сыпучих и кусковых материалов (шахтные и вращающиеся печи, агломерационные решетки, печи для обжига в кипящем слое и во взвешенном состоянии) и печи для формованных изделий (камерные, кольцевые, туннельные и конвейерные).

Плавильными называют *установки*, в которых исходное сырье доводится до плавления и выдается из установки в жидком виде для последующей отливки строительных изделий или для распыла расплава в вату. По существу, плавильные установки являются разновидностью печных. Плавильные установки используют для получения различного рода расплавов. Как правило, эти установки классифицируют по их конструктивным признакам. Чаще всего в промышленности строительных материалов используют вагранки, ванны и горшковые печи.

Тепловлажностными называют *установки*, в которых исходный материал или изделия проходят обработку при одновременном воздействии повышенных температур и влаги.

Установки для тепловлажностной обработки нашли широкое применение в промышленности сборного железобетона. Для пропарки и запарки железобетонных изделий используют ямные, туннельные, щелевые и вертикальные камеры пропаривания, кассетные установки и автоклавы. В последнее время для этих же целей применяют термоформы и пакеты (рис. 5.8, а). По режиму работы установки подразделяют на непрерывные и периодические. Важнейшим условием получения продукта с заданными технологическими свойствами является поддержание в установке требуемого теплового режима.

Тепловым режимом называют основные параметры, при которых происходит тепловая обработка материалов и изделий: температура, время ее воздействия на материал, относительная влажность среды установки, давление, состав газов и скорость их перемещения.

Основными показателями работы тепловых установок являются: удельный расход теплоты и удельный расход условного топлива, коэффициент полезного действия установки, удельный съем продукции с единицы рабочей площади или единицы объема аппарата.

Удельный расход теплоты на единицу готовой продукции

$$q = Q/G, \quad (5.58)$$

где Q — часовой расход теплоты; G — часовая производительность установки в единицах продукции.

Удельный расход условного топлива (b_y)

$$b_y = B_y/G, \quad (5.59)$$

где B_y — часовой расход условного топлива.

КПД установки

$$\eta = Q_{\text{полез}}/Q_{\text{затрач}}, \quad (5.60)$$

где $Q_{\text{полез}}$ — полезно затраченная теплота; $Q_{\text{затрач}}$ — вся теплота, затраченная в тепловой установке.

Удельный съем с 1 м² теплового агрегата

$$g_f = G/A, \quad (5.61)$$

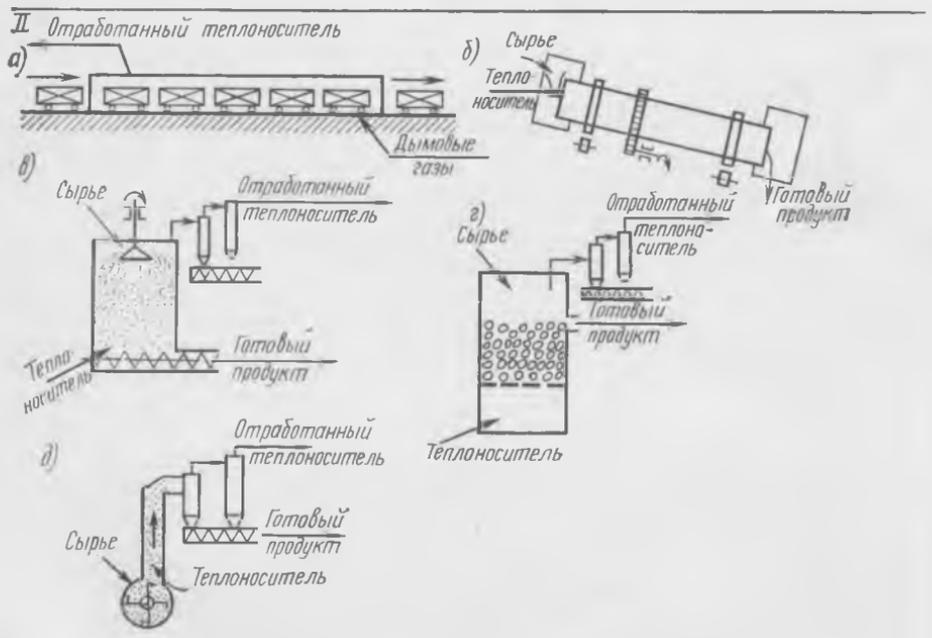
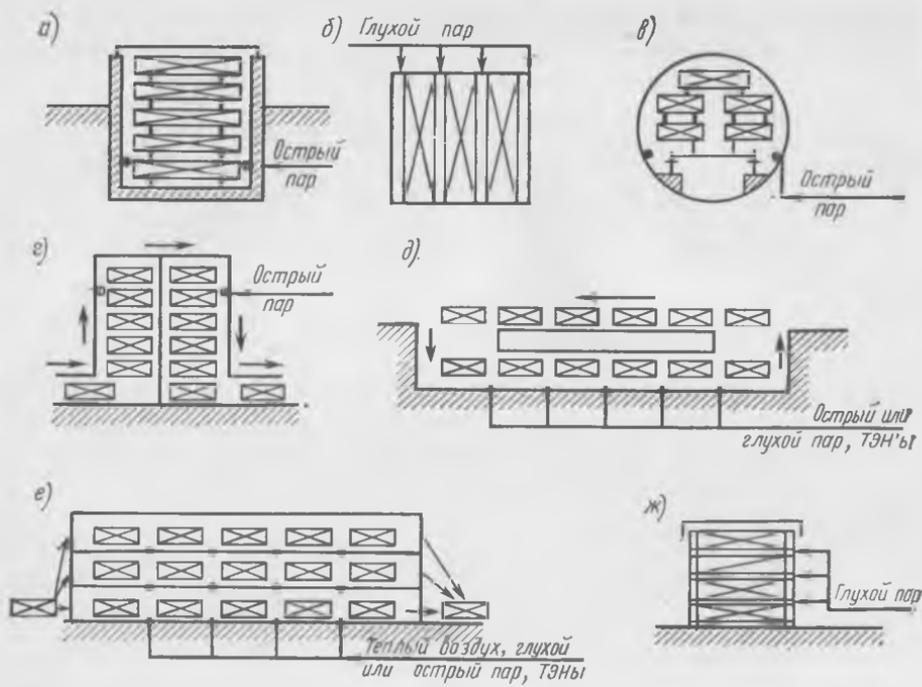
где A — площадь рабочего сечения установки.

Удельный съем (g_v) с 1 м³ рабочего объема

$$g_v = G/V, \quad (5.62)$$

где V — рабочий объем установки.

Учитывая перечисленные показатели работы установок, можно сформулировать основные требования, предъявляемые к конструкции установки: 1. Обеспечение требуемого качества получаемой продукции при заданной производительности установки. 2. Воз-



возможность осуществления надежного и быстрого контроля теплового режима и обеспечение возможности эффективного регулирования теплового режима в заданных технологией пределах. 3. Малые удельные расходы теплоты и условного топлива на единицу продукции при высоком КПД установки. 4. Высокие удельные съемы продукции при обеспечении максимальной компактности установки. 5. Возможность быстрого ремонта, сборность конструкции. 6. Невысокая стоимость установки, ее долговечность, невысокая себестоимость тепловой обработки. 7. Безопасность работы обслуживающего персонала.

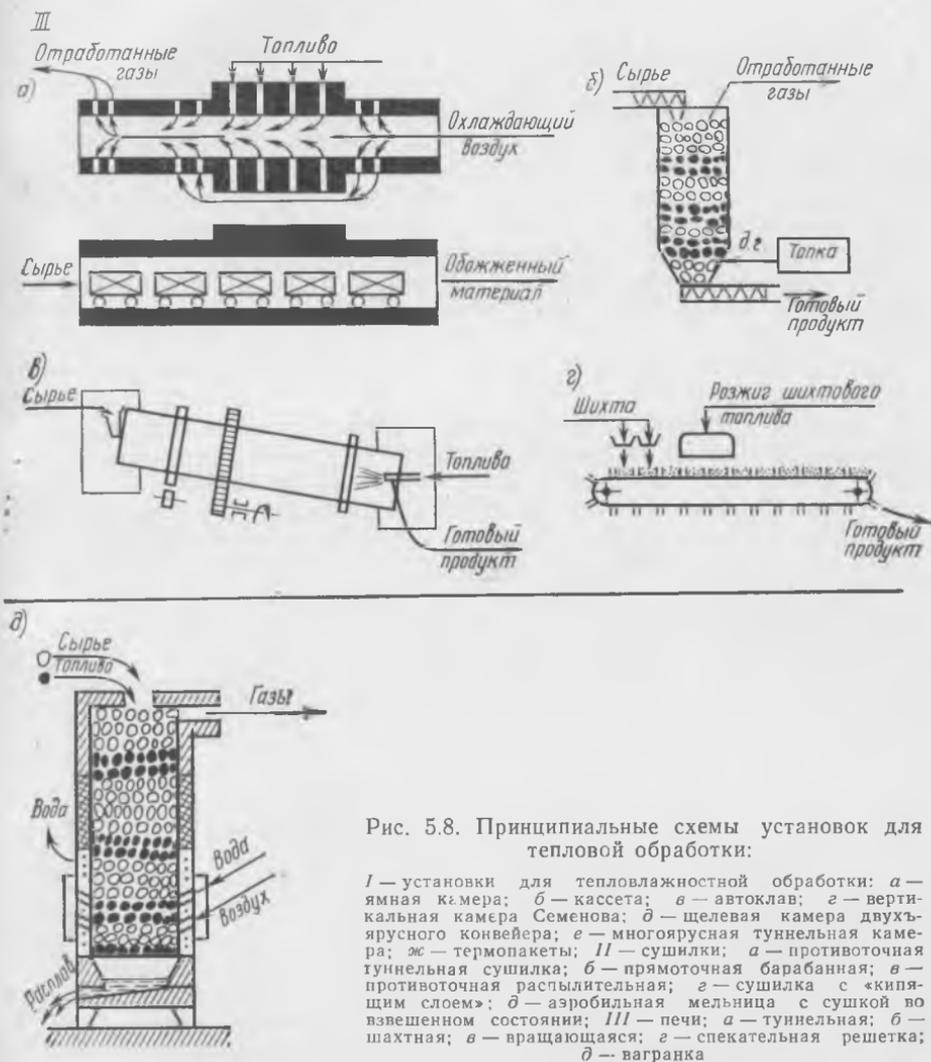


Рис. 5.8. Принципиальные схемы установок для тепловой обработки:

I — установки для тепловлажностной обработки: а — ямная камера; б — кассета; в — автоклав; г — вертикальная камера Семенова; д — щелевая камера двухъярусного конвейера; е — многоярусная туннельная камера; ж — термопакеты; II — сушилки: а — противоточная туннельная сушилка; б — прямоточная барабанная; в — противоточная распылительная; г — сушилка с «кипящим слоем»; д — аэробильная мельница с сушкой во взвешенном состоянии; III — печи: а — туннельная; б — шахтная; в — вращающаяся; г — спекательная решетка; д — вагранка

§ 6.1. Классификация массообменных процессов

Массообменными называют процессы, характеризующиеся переходом вещества из одной фазы в другую. Обычно под массообменом понимают переход компонента смеси из области высокой концентрации в область более низкой концентрации. Во всех случаях вещества, которыми обмениваются фазы, должны переместиться внутри одной из фаз к поверхности раздела, пересечь ее и далее переместиться от поверхности раздела внутрь другой фазы. Массообмен — это совокупность перечисленных трех стадий процесса массообмена между фазами. Перенос вещества внутри одной фазы к поверхности раздела или от нее к другой фазе называют *массообменом*.

Массообменные процессы характерны для любой химической технологии. В технологии органических строительных материалов распространены все основные массообменные процессы, характерные для химической технологии. В производстве неорганических строительных материалов из массообменных процессов наибольшее распространение имеют процессы сушки и кристаллизации, реже — процессы экстракции и адсорбции. Общепринятая классификация подразделяет массообменные процессы на следующие виды.

1. Сушка — удаление влаги из твердых материалов путем ее испарения.

2. Кристаллизация — выделение твердой фазы в виде кристаллов из растворов или расплавов. Процесс характеризуется переходом вещества из жидкой фазы в твердую вследствие изменения его растворимости. В промышленности строительных материалов процессы схватывания и твердения вяжущих связаны в первую очередь с процессами кристаллизации.

3. Адсорбция — избирательное поглощение газов, паров или растворов поверхностью твердого тела. Ионный обмен, находящий в последнее время значительное распространение в керамической промышленности, является разновидностью адсорбции. Он основан на способности некоторых твердых веществ (ионитов) обменивать свои подвижные ионы на ионы растворов электролитов.

4. Экстрагирование — извлечение из твердого или жидкого вещества одного или нескольких компонентов с помощью растворителя. При этом извлекаемые компоненты переходят из твердой или жидкой фазы в растворитель.

5. Абсорбция — поглощение газов или паров жидкими поглотителями. Процесс характеризуется переходом вещества из газовой фазы в жидкую.

6. Ректификация — разделение гомогенных жидких смесей путем многократного частичного испарения жидкости с последующей конденсацией образующихся паров. Однократное частичное испарение с последующей конденсацией носит название перегонки.

Из приведенных кратких характеристик основных массообменных процессов следует, что для всех их общим является переход вещества из одной фазы в другую. Этот переход связан с явлениями конвективного переноса и молекулярной диффузии, поэтому перечисленные процессы иногда называют диффузионными.

§ 6.2. Механизм и движущая сила массообменных процессов

В массообмене участвуют как минимум три вещества: два распределяющих вещества, составляющие первую и вторую фазу, и распределяемое вещество, переходящее из одной фазы в другую. Поясним это следующим примером.

Пусть A — первая фаза, B — вторая фаза и M — распределяемое вещество, составляющее третью фазу. Массообменные процессы обратимы, поэтому распределяемое вещество M может переходить из фазы A в B и наоборот в зависимости от концентрации этого вещества в распределяющих фазах. Допустим, что распределяемое вещество находится только в фазе A и имеет концентрацию \bar{Y} . Тогда в фазе B его концентрация $\bar{X}=0$.

Если распределяющие фазы приблизить друг к другу, то начнется переход распределяемого вещества из фазы A в фазу B и его концентрация в фазе B станет $\bar{X}>0$. Как только \bar{X} станет больше 0, начнется обратный переход M из фазы B в фазу A . Доля молекул, переходящих из A в B и обратно, будет одинакова, но так как общее число молекул M в области высокой концентрации (фаза A) больше, чем в области низкой концентрации (фаза B), то в результате происходит перемещение молекул M из фазы A в фазу B . Через некоторый промежуток времени скорости перехода распределяемого вещества из фазы A в фазу B и обратно становятся одинаковыми и наступает так называемое равновесное состояние.

В каждом конкретном случае существует определенная зависимость между концентрациями распределяемого вещества в обеих фазах.

Любой концентрации \bar{X} соответствует равновесная концентрация \bar{Y}_p и наоборот, т. е. имеет место равенство

$$\bar{Y}_p = f'(\bar{X}); \quad (6.1)$$

$$\bar{X}_p = f''(\bar{Y}). \quad (6.2)$$

Зная равновесные концентрации, можно характеризовать направление течения процесса и скорость его течения. Если $\bar{Y} > \bar{Y}_p$ и, следовательно, $\bar{X} < \bar{X}_p$, то вещество M будет переходить из фазы A в фазу B . При равновесии из фазы A в фазу B и обратно переходит m частиц вещества M . Если количество частиц вещества M в фазе A увеличить до $m+n$, то вещество M будет перемещаться из A в B и скорость этого перемещения будет определяться не общим количеством $(m+n)$ вещества M в фазе A , а количеством

частиц n вещества M , избыточным по отношению к равновесному. Таким образом, движущая сила массообменных процессов определяется степенью отклонения от равновесия, т. е. разностью между фактической (рабочей) и равновесной концентрациями.

Как и для любых других процессов, скорость массопередачи прямо пропорциональна движущей силе процесса и обратно пропорциональна сопротивлению. Если принять, что dM — количество вещества, перешедшего из одной фазы в другую за время dt ; dA — поверхность фазового контакта; Δ — движущая сила процесса, а R — сопротивление, то можно записать

$$dM/(dAdt) = \Delta/R \quad (6.3)$$

или, приняв $1/R = K$, где K — коэффициент массопередачи, получим

$$dM/(dAdt) = K\Delta. \quad (6.4)$$

Если обозначить массовые скорости распределяющих фаз вдоль поверхности их раздела через A_m и B_m , а концентрации распределяемого вещества соответственно \bar{Y} и \bar{X} , то при $\bar{Y} > \bar{Y}_p$ и отсутствии потерь в процессе взаимодействия фаз при параллельных потоках (прямоток) вдоль поверхности раздела значение \bar{Y} уменьшится, а \bar{X} увеличится (рис. 6.1, а).

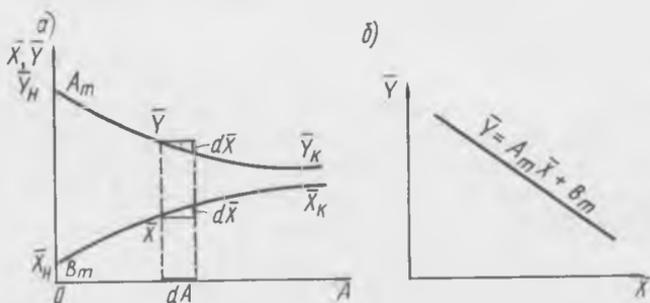


Рис. 6.1. К выводу уравнения рабочей линии (а) и рабочая линия процесса (б)

Для элемента поверхности

$$dM = A_m (-d\bar{Y}) = B_m d\bar{X}. \quad (6.5)$$

Интегрируя в пределах от начальных до конечных концентраций, имеем

$$M = -A_m (\bar{Y}_k - \bar{Y}_n) = A_m (\bar{Y}_n - \bar{Y}_k) = B_m (\bar{X}_k - \bar{X}_n), \quad (6.6)$$

а в пределах от начальных до некоторых рабочих концентраций получим

$$A_m (\bar{Y}_n - \bar{Y}) = B_m (\bar{X} - \bar{X}_n), \quad (6.7)$$

откуда

$$\bar{Y} = \frac{B_m}{A_m} \bar{X} + \frac{A_m \bar{X}_n - B_m \bar{Y}_n}{A_m} \quad (6.8)$$

или

$$\bar{Y} = A_m^* \bar{X} + B_m^* \quad (6.9)$$

Аналогично, для противоточного процесса

$$\bar{Y} = A_m^* \bar{X} + B_m^* \quad (6.10)$$

Из уравнений (6.9) и (6.10) следует, что концентрации распределяемого вещества в фазах A и B связаны линейной зависимостью. Уравнение прямой, выражающее зависимость между рабочими концентрациями, называют рабочей линией процесса (рис. 6.1, б). Поскольку движущая сила определяется степенью отклонения от равновесия, ее можно выразить либо через концентрации распределяемого вещества в фазе A , т. е. через \bar{Y} , либо через концентрацию его в фазе B , т. е. через \bar{X} .

Из изложенного следует, что если отнести массоперенос к единице времени, то основное уравнение можно записать двояко:

$$dM = K_Y \Delta \bar{Y} dA = K_X \Delta \bar{X} dA \quad (6.11)$$

и

$$K_Y \Delta \bar{Y} = K_X \Delta \bar{X} \quad (6.12)$$

Поскольку движущая сила меняется с изменением рабочих концентраций, для всего процесса массообмена, протекающего в пределах изменения концентраций от начальных до конечных, должна быть определена средняя движущая сила.

При определении средней движущей силы могут быть два случая: 1) зависимость между равновесными концентрациями нелинейна; для этого случая равновесная концентрация определяется общей функциональной зависимостью $\bar{Y}_p = f(\bar{X})$; 2) зависимость между равновесными концентрациями линейна, т. е. $\bar{Y}_p = L\bar{X}$ (где L — постоянная величина).

Сначала найдем среднюю движущую силу для первого случая. Рассмотрим изменение концентраций \bar{X} и \bar{Y} вдоль поверхности раздела фаз при их взаимодействии. Для случая $\bar{Y} > \bar{Y}_p$ при взаимодействии параллельных потоков фаз вдоль поверхности раздела \bar{Y} уменьшается, а \bar{X} увеличивается (рис. 6.2, а). Каждой концентрации \bar{X} , согласно уравнению $\bar{Y}_p = f(\bar{X})$, соответствует равновесная концентрация \bar{Y}_p . Для элемента поверхности dA движущая сила процесса может быть выражена разностью $\bar{Y} - \bar{Y}_p$.

На основании уравнения (6.11) основное уравнение массопердачи для всей поверхности фазового контакта A (рис. 6.3) можно написать:

$$M = A_m (\bar{Y}_n - \bar{Y}_k) = B_m (\bar{X}_k - \bar{X}_n) = K_Y \Delta \bar{Y}_m A = K_X \Delta \bar{X}_m A, \quad (6.13)$$

где $\Delta \bar{Y}_m$ и $\Delta \bar{X}_m$ — средняя движущая сила.

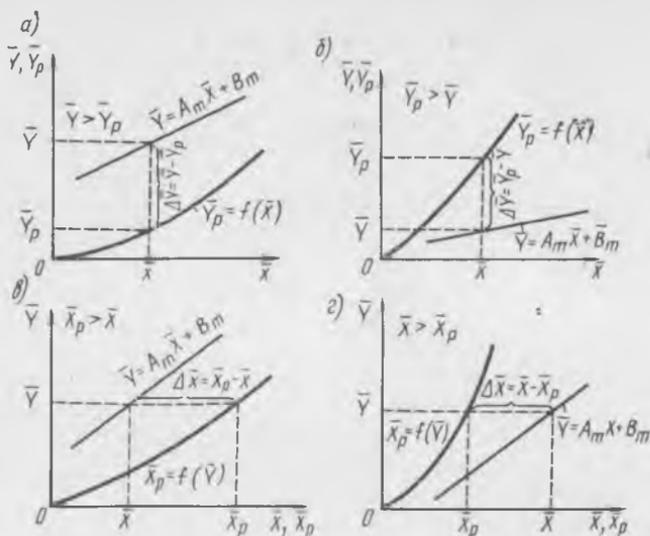


Рис. 6.2. Варианты выражения движущей силы массообменных процессов:

а — при $\bar{Y} > \bar{Y}_p$; б — $\bar{Y}_p > \bar{Y}$; в — $\bar{X}_p > \bar{X}$; г — $\bar{X} > \bar{X}_p$

Сопоставляя равенства (6.6) и (6.13), найдем

$$A = \frac{A_m}{K_Y} \frac{\bar{Y}_H - \bar{Y}_K}{\Delta \bar{Y}_m} = \frac{B_m}{K_X} \frac{\bar{X}_K - \bar{X}_H}{\Delta \bar{X}_m} \quad (6.14)$$

Величины, входящие в уравнение (6.14), $m_Y = (\bar{Y}_H - \bar{Y}_K) / \Delta \bar{Y}_m$ и $m_X = (\bar{X}_K - \bar{X}_H) / \Delta \bar{X}_m$, имеют существенный физический смысл: дробь показывает, на сколько единиц изменяет рабочую концентрацию единица движущей силы. Величины m_Y и m_X называют числом единиц переноса.

Наряду с этими уравнениями массопередачи для элемента поверхности dA имеем $dM = K_Y (\bar{Y} - \bar{Y}_p) dA$ и $dM = A_m (-dY)$. Из сопоставления последних равенств получим

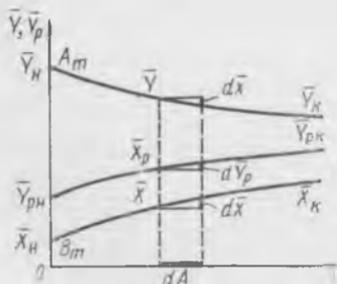


Рис. 6.3. К определению средней движущей силы массообменных процессов

$$dA = - \frac{A_m}{K_Y} \frac{d\bar{Y}}{\bar{Y} - \bar{Y}_p} \quad (6.15)$$

а после интегрирования в пределах $0 - A$ и $\bar{Y}_H - \bar{Y}_K$ имеем

$$A = - \frac{A_m}{K_Y} \int_{\bar{Y}_H}^{\bar{Y}_K} \frac{d\bar{Y}}{\bar{Y} - \bar{Y}_p} \quad (6.16)$$

Заменяя из уравнения (6.14) $A = M/(\bar{Y}_H - \bar{Y}_K)$, имеем

$$A = \frac{M}{K_Y(\bar{Y}_H - \bar{Y}_K)} \int_{\bar{Y}_K}^{\bar{Y}_H} d\bar{Y}/(\bar{Y} - \bar{Y}_p) \quad (6.17)$$

или

$$M = K_Y A \frac{\bar{Y}_H - \bar{Y}_K}{\int_{\bar{Y}_K}^{\bar{Y}_H} d\bar{Y}/(\bar{Y} - \bar{Y}_p)} \quad (6.18)$$

Выражая движущую силу через концентрации \bar{X} , аналогично предыдущему, получим

$$M = K_X A \frac{\bar{X}_K - \bar{X}_H}{\int_{\bar{X}_H}^{\bar{X}_K} d\bar{X}/(\bar{X}_p - \bar{X})} \quad (6.19)$$

Сравнив уравнения (6.18) и (6.19) с уравнением (6.14), найдем следующие выражения для средней движущей силы:

$$\Delta\bar{Y}_m = \frac{\bar{Y}_H - \bar{Y}_K}{\int_{\bar{Y}_K}^{\bar{Y}_H} d\bar{Y}/(\bar{Y} - \bar{Y}_p)} \quad (6.20)$$

$$\Delta\bar{X}_m = \frac{\bar{X}_K - \bar{X}_H}{\int_{\bar{X}_H}^{\bar{X}_K} d\bar{X}/(\bar{X}_p - \bar{X})} \quad (6.21)$$

При практическом использовании уравнений (6.20) и (6.21) знаменатель дробей находят графическим интегрированием. Так, в пределах концентраций $\bar{Y}_K - \bar{Y}_H$ через определенные интервалы для ряда значений \bar{Y} находят соответствующие им величины \bar{X} , \bar{Y}_p , $\bar{Y} - \bar{Y}_p$ и $1/(\bar{Y} - \bar{Y}_p)$. Далее на диаграмме в координатах \bar{Y} , $1/(\bar{Y} - \bar{Y}_p)$ строят кривую (рис. 6.4). Площадь под кривой, ограниченная ординатами \bar{Y}_K и \bar{Y}_H , умноженная на масштаб диаграммы, дает искомый интеграл:

$$S_{YA} = \int_{\bar{Y}_K}^{\bar{Y}_H} d\bar{Y}/(\bar{Y} - \bar{Y}_p) \quad (6.22)$$

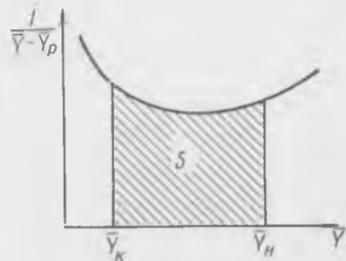


Рис. 6.4. Определение движущей силы графическим интегрированием

В случае выражения движущей силы через концентрацию аналогичным путем определяют

$$S_{Xa'} = \int_{\bar{X}_n}^{\bar{X}_k} d\bar{X}/(\bar{X}_p - \bar{X}). \quad (6.23)$$

Дроби правой части равенств (6.22) и (6.23) имеют тот же физический смысл, что и m_X и m_Y , т. е. смысл числа единиц переноса. В случае, когда между равновесными и рабочими концентрациями существует прямолинейная зависимость, для определения средней движущей силы и числа единиц переноса могут быть выведены более простые соотношения. Так, для условий $\bar{Y} = A_m \bar{X}$ и $\bar{Y}_p = A_m^p \bar{X}$ соотношение (6.22) переписывается в следующем виде*:

$$m_Y = \int_{\bar{Y}_k}^{\bar{Y}_n} d\bar{Y}/(\bar{Y} - \bar{Y}_p) = \int_{\bar{Y}_k}^{\bar{Y}_n} \frac{d\bar{Y}}{\bar{Y} - \frac{A_m^p}{A_m} \bar{Y}} = \frac{A_m}{A_m - A_m^p} \int_{\bar{Y}_k}^{\bar{Y}_n} \frac{d\bar{Y}}{\bar{Y}}, \quad (6.24)$$

а в результате интегрирования

$$m_Y = A_m/(A_m - A_m^p) \ln \bar{Y}_n/\bar{Y}_k. \quad (6.25)$$

Для вывода соотношения, определяющего среднюю движущую силу, преобразуем $\ln(\bar{Y}_n/\bar{Y}_k)$ следующим образом:

$$\ln \bar{Y}_n/\bar{Y}_k = \ln \frac{\left(1 - \frac{A_m^p}{A_m}\right) \bar{Y}_n}{\left(1 - \frac{A_m^p}{A_m}\right) \bar{Y}_k} = \ln \frac{\bar{Y}_n - \frac{A_m^p}{A_m} \bar{Y}_n}{\bar{Y}_k - \frac{A_m^p}{A_m} \bar{Y}_k} = \ln \frac{\bar{Y}_n - \bar{Y}_{pn}}{\bar{Y}_k - \bar{Y}_{pk}}. \quad (6.26)$$

Разность $\bar{Y}_n - \bar{Y}_k$ представим следующим образом:

$$\begin{aligned} \bar{Y}_n - \bar{Y}_k &= \frac{A_m}{A_m - A_m^p} \left(\frac{A_m - A_m^p}{A_m} \bar{Y}_n - \frac{A_m - A_m^p}{A_m} \bar{Y}_k \right) = \\ &= \frac{A_m}{A_m - A_m^p} [(\bar{Y}_n - \bar{Y}_{pn}) - (\bar{Y}_k - \bar{Y}_{pk})]. \end{aligned} \quad (6.27)$$

На основе полученных выражений соотношение (6.20) может быть представлено в виде

$$\Delta \bar{Y}_m = \frac{(\bar{Y}_n - \bar{Y}_{pn}) - (\bar{Y}_k - \bar{Y}_{pk})}{\ln(\bar{Y}_n - \bar{Y}_{pn})/(\bar{Y}_k - \bar{Y}_{pk})} \quad (6.28)$$

* Выведенные ниже соотношения справедливы и для $\bar{Y} = A\bar{X} + B$.

или в виде

$$\Delta \bar{Y}_m = \frac{\Delta \bar{Y}_n - \Delta \bar{Y}_k}{2,3 \lg \Delta \bar{Y}_n / \Delta \bar{Y}_k}, \quad (6.29)$$

где $\Delta \bar{Y}_n = \bar{Y}_n - \bar{Y}_{рп}$ — движущая сила в начале поверхности фазового контакта; $\Delta \bar{Y}_k = \bar{Y}_k - \bar{Y}_{рк}$ — движущая сила в конце поверхности фазового контакта.

Следовательно, для прямолинейной равновесной зависимости средняя движущая сила процесса определяется как средняя логарифмическая между движущими силами в начале и в конце поверхности фазового контакта.

Аналогичным путем может быть получено соотношение и для величины $\Delta \bar{X}_m$:

$$\Delta \bar{X}_m = \frac{\Delta \bar{X}_k - \Delta \bar{X}_n}{2,3 \lg \Delta \bar{X}_k / \Delta \bar{X}_n}, \quad (6.30)$$

где $\Delta \bar{X}_k = \bar{X}_{рк} - \bar{X}_k$ и $\Delta \bar{X}_n = \bar{X}_{рп} - \bar{X}_n$.

§ 6.3. Основные законы массопередачи

В процессах переноса вещества из одной фазы в другую различают два случая: 1) перенос между потоками жидкости; 2) перенос из твердого тела в поток жидкости (или в обратном направлении).

Законами, которым подчиняется перенос распределяемого вещества из одной фазы в другую, являются законы: молекулярной диффузии (первый закон Фика), массоотдачи и массопроводности.

Формулировка первого закона Фика аналогична закону теплопроводности: количество протифундировавшего вещества пропорционально градиенту концентраций, площади, перпендикулярной направлению потока и времени:

$$dm = -D \frac{dc}{dx} dAdt \quad (6.31)$$

или

$$m = -DA t (\bar{dc}/dx). \quad (6.32)$$

Тогда по аналогии с теплопроводностью удельный поток вещества, переносимого молекулярной диффузией через единицу поверхности в единицу времени:

$$q_m = m/(At) = -D(\bar{dc}/dx). \quad (6.33)$$

Коэффициент пропорциональности D называется коэффициентом диффузии; он представляет собой физическую константу, характеризующую способность данного вещества проникать вследствие диффузии в неподвижную среду. Величина D не зависит от гидродинамических условий протекания процесса и является функцией свойств распределяемого и распределяющего вещества, температуры и давления.

Опыт показывает, что коэффициент диффузии зависит прежде всего от агрегатного состояния вещества — для газов, например, он на четыре порядка выше, чем для жидкостей. D увеличивается с увеличением температуры и уменьшается с повышением давления.

Перенос вещества внутри фазы может происходить либо путем молекулярной диффузии, подчиняющейся первому закону Фика, либо путем конвекции и молекулярной диффузии одновременно. Строго говоря, молекулярной диффузией вещество перемещается только в неподвижной среде. Если среда движется, то перенос вещества осуществляется как молекулярной диффузией, так и самой средой в направлении ее движения или отдельными частицами этой среды, двигающимися в различных направлениях.

Выделим в установившемся потоке элементарный параллелепипед (рис. 6.5) с ребрами dx , dy , dz . Не останавливаясь подробно

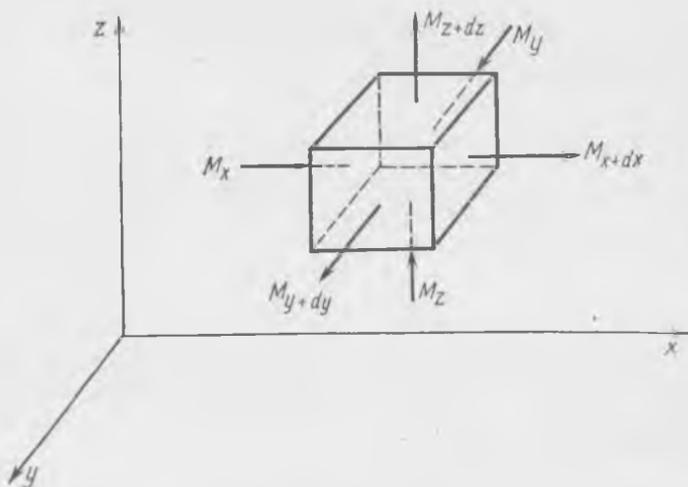


Рис. 6.5. К выводу второго закона Фика

на рассуждениях (они аналогичны выводу дифференциальных уравнений движения Навье — Стокса), можно сказать, что за время dt вследствие перемещения вещества только за счет конвективного переноса содержание распределяемого вещества в объеме параллелепипеда изменится на величину

$$dm_k = (v_x \partial c / \partial x + v_y \partial c / \partial y + v_z \partial c / \partial z) dV dt. \quad (6.34)$$

За счет только молекулярной диффузии количество распределяемого вещества в объеме параллелепипеда за время dt изменится на величину

$$dm_m = D (\partial^2 c / \partial x^2 + \partial^2 c / \partial y^2 + \partial^2 c / \partial z^2) dV dt. \quad (6.35)$$

Поскольку рассматривается установившийся процесс, изменение концентрации распределяемого вещества не зависит от време-

ни, а является функцией координат точки. Тогда изменение концентрации распределяемого вещества за счет конвективного переноса должно компенсироваться таким же по величине изменением концентрации (но с обратным знаком) за счет молекулярной диффузии, т. е. должно соблюдаться условие

$$dm_k = dm_m. \quad (6.36)$$

Из (6.34) и (6.35) получим

$$v_x \frac{\partial c}{\partial x} + v_y \frac{\partial c}{\partial y} + v_z \frac{\partial c}{\partial z} = D (\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2}) \quad (6.37)$$

или

$$v \operatorname{grad} c = D \nabla^2 c. \quad (6.38)$$

Формулы (6.37) и (6.38) представляют собой дифференциальные уравнения конвективного массообмена при установившемся процессе.

Для неустановившегося процесса массообмена (но в условиях стационарного потока фазы) левая часть должна быть дополнена изменением концентрации распределенного вещества во времени

$$\frac{\partial c}{\partial t} + v_x \frac{\partial c}{\partial x} + v_y \frac{\partial c}{\partial y} + v_z \frac{\partial c}{\partial z} = D (\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2}). \quad (6.39)$$

При массообмене в неподвижной среде $v_x = v_y = v_z = 0$ и конвективная составляющая левой части уравнения обратится в 0, а уравнение примет вид

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D (\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2}) = D \nabla^2 c. \quad (6.40)$$

Выражение (6.40) является дифференциальным уравнением конвективного массообмена при неустановившемся процессе (второй закон Фика).

Основной закон массоотдачи: количество вещества, перенесенного от поверхности раздела фаз в воспринимающую среду, пропорционально разности концентраций у поверхности раздела фаз и в ядре потока воспринимающей фазы, поверхности фазового контакта и времени:

$$dm = \beta (\bar{c}_r - \bar{c}_f) dA dt, \quad (6.41)$$

где dm — количество перенесенного вещества; β — коэффициент массоотдачи, характеризующий перенос вещества конвективными и диффузионными потоками одновременно; \bar{c}_r — концентрация вещества в воспринимающей фазе у поверхности раздела; \bar{c}_f — то же, в ядре потока воспринимающей фазы; dA — поверхность раздела; dt — время переноса.

Для установившегося процесса

$$dm = \beta (\bar{c}_r - \bar{c}_f) dA, \quad (6.42)$$

а при постоянстве A

$$m = \beta (\bar{c}_r - \bar{c}_f) A. \quad (6.43)$$

Коэффициент массоотдачи в отличие от коэффициента диффузии является не физической, а кинетической характеристикой, зависящей как от физических свойств фазы, так и от гидродинамических условий в ней. Для того чтобы определить коэффициент массоотдачи, необходимо проинтегрировать уравнения конвективной диффузии совместно с уравнениями Навье — Стокса и уравнением неразрывности потока (см. гл. 5) при определенных начальных и граничных условиях. Однако система указанных уравнений не имеет общего решения, поэтому для нахождения связи между переменными прибегают к теории подобия.

Количество вещества, перемещающегося из фазы в фазу у границы раздела, определяется законом конвективной диффузии: $dm = \beta(\bar{c}_r - \bar{c}_f) dA dt$. В то же время у границы раздела фаз вещество переходит из фазы в фазу за счет молекулярной диффузии, описываемой уравнением $dm = -D \frac{\partial c}{\partial x} dA dt$, тогда

$$\beta \Delta c = -D \partial \bar{c} / \partial x, \quad (6.44)$$

где $\Delta c = \bar{c}_r - \bar{c}_f$.

Разделив левую часть уравнения (6.44) на правую, отбросив знаки математических операторов, заменив x на l и сократив c , получим диффузионный критерий Нуссельта, выражающий отношение интенсивности переноса в ядре фазы к интенсивности переноса в диффузионном пограничном подслое

$$Nu' = \beta l / D. \quad (6.45)$$

При одномерной диффузии в неустановившемся процессе уравнение второго закона Фика имеет вид

$$\partial c / \partial t + v_x \partial c / \partial x = D \partial^2 c / \partial x^2,$$

где $\partial c / \partial t$ — выражает изменение концентрации во времени; $v_x \partial c / \partial x$ — распределение концентрации за счет конвективного переноса; $D \partial^2 c / \partial x^2$ — то же, за счет молекулярной диффузии.

Тогда, отбросив знаки математических операторов, заменив x на l и разделив третий член на первый, получим диффузионный критерий Фурье, характеризующий постоянство отношения изменения концентрации во времени к изменению концентрации за счет молекулярного переноса:

$$Fo' = Dt / l^2. \quad (6.46)$$

Отношение второго члена к третьему даст диффузионный критерий Пекле, выражающий меру отношения массы вещества, переносимой за счет конвективного и диффузионного переноса:

$$Pe' = v l / D. \quad (6.47)$$

Кроме массообменных критериев подобие процессов массопередачи определяется гидродинамическим и геометрическим подобием, т. е.

$$f(Fo', Nu', Pe', Re', Fr', L_1/L_0, L_2/L_0, L_n/L_0) = 0. \quad (6.48)$$

Поскольку определяемым критерием является критерий Нуссельта, выражение (6.48) можно записать в виде

$$Nu' = f'(Fo, Pe', Re, Fr, L_1/L_0, \dots, L_n/L_0). \quad (6.49)$$

Уравнения (6.48) и (6.49) называются обобщенными (критериальными) уравнениями массоотдачи.

§ 6.4. Массопередача в твердой фазе.

Перемещение влаги в капиллярно-пористых телах

Массопроводностью называют процесс перемещения вещества в твердой фазе. Большинство строительных материалов представляют собой капиллярно-пористые тела, массообмен которых с окружающей средой определяется не только массоотдачей (в основном влагоотдачей) с поверхности материала в окружающую среду, но и подводом влаги из внутренних слоев материала (массопроводностью) к поверхности раздела фаз.

Массопроводность определяет скорость массообмена материала со средой, а также влияет на физико-технические свойства самого материала в процессе его производства. Например, при сушке керамических изделий в результате направленности потока жидкой и газообразной фаз от центра к поверхности могут происходить (а при неправильно выбранных режимах обработки — и происходят) необратимые нарушения структуры материала и, как следствие, снижение его эксплуатационных характеристик.

В научной литературе при описании процессов массопроводности пользуются термином «стесненная диффузия». «Стеснение» объясняется механическим преграждением диффузионного потока самим скелетом капиллярно-пористого тела и сопротивлением движению молекул жидкости или газа вследствие непосредственной близости стенок пор и капилляров к движущимся молекулам.

Например, Кади и Вильямс для стесненной диффузии раствора в твердом теле предложили формулу

$$D_{ст} = D \frac{1}{1 + ar/R}, \quad (6.50)$$

где $D_{ст}$ — коэффициент стесненной диффузии; D — то же, молекулярной диффузии; a — коэффициент пропорциональности; r — размер диффундирующих молекул; R — размер пор твердого тела в направлении, перпендикулярном движению диффундирующих молекул.

В технике, по аналогии с теплопроводностью, вместо понятия «стесненной диффузии» пользуются понятием коэффициента массопроводности.

Основной закон переноса вещества в твердом теле: количество вещества, переместившегося в твердой фазе за счет массопровод-

ности, пропорционально градиенту концентрации, площади, перпендикулярной направлению потока вещества, и времени. т. е.

$$dm = -K \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} dAdt \quad (6.51)$$

или

$$q_m = -K \partial \bar{c} / \partial x. \quad (6.52)$$

В этом уравнении коэффициент пропорциональности K , имеющий размерность коэффициента диффузии, может быть назван коэффициентом массопроводности. При принятом законе массопроводности процесс перемещения вещества внутри твердой фазы может быть описан дифференциальным уравнением массопроводности

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} = K \left(\frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial z^2} \right) = K \nabla^2 \bar{c}. \quad (6.53)$$

Очевидно, что коэффициент массопроводности не является постоянной величиной. Он зависит от природы проходящего процесса (адсорбция, сушка), ряда факторов, определяющих величину коэффициента молекулярной диффузии, и структуры твердого пористого тела.

Идеализированная схема перемещения вещества из твердой в жидкую (газовую, паровую) фазу приведена на рис. 6.6. Твердая фаза представляет собой неограниченную пластину толщиной 2δ . В начальный момент времени концентрация распределяемого вещества постоянна во всем объеме пластины и равна \bar{c}_n . Пластину с двух сторон омывает поток воспринимающей (распределяющей) фазы. Вследствие симметрии системы рассматривается процесс, протекающий только по одну сторону от средней плоскости пластины и направлению потока, концентрация распределяемого вещества в ядре омывающей фазы постоянна в течение всего процесса и равна \bar{Y}_n . При $\bar{c}_n > \bar{c}_p$ (предполагается, что зависимость $\bar{c}_p = f(\bar{Y})$ известна) распре-

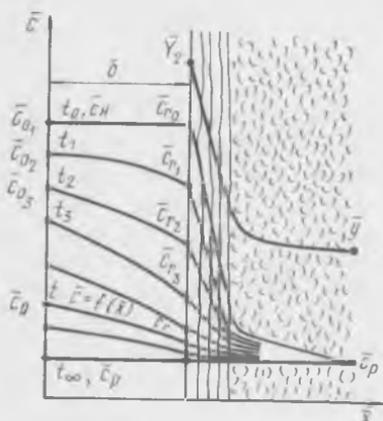


Рис. 6.6. Перемещение распределяемого вещества из твердой в жидкую (газовую) фазу

деляемое вещество перемещается из твердой фазы в ядро омывающей фазы, причем от средней плоскости пластины к поверхности вещество перемещается массопроводностью (внутренний массоперенос), а от поверхности в ядро омывающей фазы — конвективной диффузией (внешний массоперенос).

В начальный момент времени t_0 градиент концентрации по толщине пластины $\partial \bar{c} / \partial x = 0$ ($\bar{c} = \text{const} = \bar{c}_n$) и вещество начинают пере-

мещаться в омывающую фазу из твердой фазы только из объема, непосредственно примыкающего к поверхности раздела фаз. В омывающей фазе концентрация изменяется от \bar{Y}_r до \bar{Y} или от $\bar{c}_{r_0} = \bar{c}_n$ до \bar{c}_p .

В последующие моменты времени t_1, t_2, \dots, t вследствие перехода вещества из твердой фазы в омывающую фазу по толщине пластины наблюдаются градиенты концентраций $\partial \bar{c} / \partial x \neq 0$ и концентрации в твердой фазе меняются соответственно от $\bar{c}_0, \bar{c}_{0_2}, \dots, \bar{c}_0$ в средней плоскости до $\bar{c}_{r_1}, \bar{c}_{r_2}, \dots, \bar{c}_r$ на границе раздела фаз, а в восприимчивой фазе от $\bar{c}_r, \bar{c}_{r_2}, \dots, \bar{c}_r$ до \bar{c}_p в ядре потока. Предельное (минимальное) значение концентрации в твердой фазе \bar{c}_p соответствует времени $t \rightarrow \infty$ (t_∞). Как видно из рассмотренной схемы, особенностью массопроводности является неустановившееся состояние процесса.

Для решения задачи о перемещении вещества внутри твердой фазы дифференциальное уравнение массопроводности должно быть дополнено уравнением, характеризующим условия на границе раздела твердой и жидкой (газовой, паровой) фаз. Это уравнение может быть выведено в результате следующих рассуждений. К элементарной площадке на границе раздела фаз подводится вещество из твердой фазы в количестве dm , которое можно определить исходя из закона массопроводности (внутренний массоперенос): $dm = -KdAdt(\partial \bar{c} / \partial x)$.

От элементарной площадки отводится в омывающую фазу то же количество вещества dm , которое можно определить исходя из закона конвективной диффузии (внешний массоперенос): $dm = \beta(\bar{c}_r - \bar{c}_p)dAdt$.

Приравнявая правые части двух последних уравнений, получаем балансовое уравнение массопереноса в системе твердое тело — газ (жидкость) в дифференциальной форме

$$-K(\partial \bar{c} / \partial x) = \beta \Delta \bar{c}. \quad (6.54)$$

Из уравнений (6.53) и (6.54) могут быть получены критерии, характеризующие перемещение вещества внутри твердой фазы. Из уравнения (6.54) получаем безразмерный комплекс делением правой части на левую $\beta \Delta \bar{c} dx / (K \partial \bar{c})$.

Вычеркнув в этом комплексе символы дифференцирования, разности направления, после сокращения получим диффузионный критерий Био

$$Bi_1 = \beta l / K. \quad (6.55)$$

Из дифференциального уравнения массопроводности $\partial \bar{c} / \partial t = K \nabla^2 \bar{c}$ получаем безразмерный комплекс делением правой части на левую $K \partial^2 \bar{c} dt / (\partial x^2 \partial \bar{c})$.

Вычеркнув в полученном комплексе символы дифференцирования и направления, после сокращений получаем диффузионный критерий Фурье

$$Fo_\pi = K / l^2, \quad (6.56)$$

характеризующий изменение скорости потока вещества, перемещаемого массопроводностью в твердом теле. Если в выражении (6.46) коэффициент молекулярной диффузии D заменить коэффициентом массопроводности K , то получим выражение (6.56).

Дифференциальное уравнение массопроводности для простейших случаев одномерного перемещения вещества имеет аналитическое решение в виде

$$E = \frac{\bar{c} - \bar{c}_p}{\bar{c}_n - \bar{c}_p} = f(\text{Bi}_d, \text{Fo}_d, x/\delta), \quad (6.57)$$

где $\bar{c} - \bar{c}_p / (\bar{c}_n - \bar{c}_p)$ — параметрический критерий, представляющий собой безразмерную концентрацию распределяемого вещества в твердой фазе в точке с координатой x ; \bar{c} — концентрация в точке с координатой x в момент t , соответствующий определенному Fo_d ; δ — определяющий размер тела, составляющего твердую фазу; x/δ — безразмерная координата точки, в которой концентрация равна c .

В момент времени t концентрация внутри пластины меняется от \bar{c}_0 до \bar{c}_r в зависимости от координаты x , т. е. $\bar{c} = f(x)$.

Аналитическое решение дифференциального уравнения массопроводности (6.56) имеется для простейших тел: неограниченных пластин или цилиндра, шара, архимедова цилиндра и куба. Функциональная зависимость представлена в виде бесконечных рядов. Для упрощения расчетов используются графиками, приводимыми в литературе для расчета безразмерных температур.

Как уже указывалось, в промышленности строительных материалов основным массообменным процессом, протекающим между твердой фазой (материалом) и газообразной фазой (теплоносителем), является сушка.

Исследуя вопросы внутреннего влагопереноса, А. В. Лыков предложил уравнение массопроводности

$$q_m = -\lambda_m \nabla \theta. \quad (6.58)$$

Сравнивая уравнения (6.52) и (6.58), нетрудно видеть, что коэффициент влагопроводности λ_m идентичен коэффициенту массопроводности K , градиент потенциала переноса массы $\nabla \theta$ — есть не что иное, как градиент концентраций в уравнении (6.46).

А. В. Лыков, П. Д. Лебедев, Г. А. Максимов и В. В. Перегудов показали, что влага в материале движется за счет градиентов влагосодержаний, температур и давлений.

Плотность общего потока влаги q_m — есть сумма плотностей потоков влаги, движущейся в материале за счет этих градиентов:

$$q_m = -a_m \rho_0 \nabla U \pm a_m \delta \rho_0 \nabla t^\circ \pm a_p \nabla p. \quad (6.59)$$

Первый член уравнения $a_m \rho_0 \nabla U = q_{mU}$ представляет собой плотность потока влаги, движущейся в материале за счет градиента влагосодержаний ∇U . По аналогии с переносом теплоты ($\nabla I = c \nabla t$ и $\lambda = ac\rho$) для переноса влаги можно записать $\nabla U = c_m \nabla \theta$ и

$\lambda_m = a_m c \rho_0$, где ∇U — аналог градиента теплосодержаний ∇I ; c_m — удельная влагоемкость — аналог удельной теплоемкости c ; $\nabla \theta$ — градиент потенциала переноса влаги — аналог градиента температур ∇t° ; λ_m — коэффициент влагопроводности — аналог коэффициента теплопроводности λ ; a_m — коэффициент потенциалопроводности — аналог коэффициента температуропроводности a . Второй член $a_m \delta \rho_0 \nabla t^\circ = q_{mt}$ — плотность потока влаги, движущейся в материале за счет градиента температур ∇t . А. В. Лыков установил, что наличие градиента температуры по сечению материала приводит к перемещению влаги в материале по направлению теплового потока. В этом уравнении δ представляет собой коэффициент переноса влаги тепло- и влагопроводностью. Третий член уравнения $a_p \nabla p = q_{mp}$ выражает плотность движущегося в материале потока влаги за счет градиента давлений ∇p . В этом выражении $a_p = a_m \delta \rho_0$ называют коэффициентом переноса влаги за счет градиента давлений. Таким образом, выражение (6.59) является развернутым уравнением внутреннего влагопереноса в материале.

Уравнение внешнего влагопереноса (влагоотдача от поверхности материала в окружающую среду)

$$q_m = -\alpha_m (P_{п.м} - P_v), \quad (6.60)$$

где α_m — коэффициент влагоотдачи, отнесенный к разности парциальных давлений [то же, что и β , в уравнении (6.41)]; $P_{п.м}$ — парциальное давление водяных паров над поверхностью материала; P_v — парциальное давление водяных паров в окружающей среде, а выражение $(P_{п.м} - P_v)$ соответствует $(\bar{c}_r - \bar{c}_f)$.

Значение коэффициента влагоотдачи α_m может быть подсчитано по экспериментальной формуле Всесоюзного теплотехнического института (ВТИ) им. Ф. Э. Дзержинского:

$$\alpha_m = 0,0229 + 0,0714v, \quad (6.61)$$

где v — скорость движения теплоносителя.

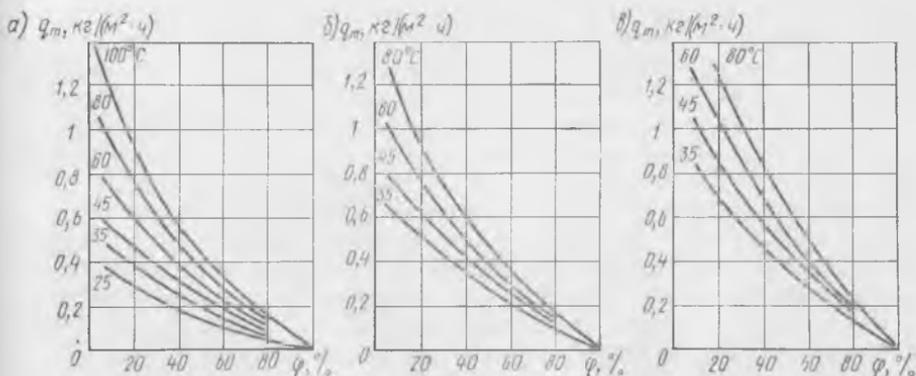


Рис. 6.7. Скорость испарения воды со свободной поверхности:

а — при скорости движения теплоносителя 1 м/с; б — то же, 2 м/с; в — то же, 4 м/с

Приняв $P_{п.м} - P_{в} = \Delta P$, по формуле Рекнагеля

$$\Delta P = 0,0013 (65 + 6,75/v) P_6 (t_c - t_m), \quad (6.62)$$

где P_6 — барометрическое давление, гПа; t_c и t_m — соответственно температуры сухого и мокрого термометров.

По приведенным на рис. 6.7 кривым, построенным Д. В. Жуковым, нетрудно подсчитать, что при $\phi = 60\%$ и температуре теплоносителя 80°C плотность потока влаги со свободной поверхности при скорости теплоносителя $v = 1$ м/с $q_m = 0,33$ кг/(м²·ч), при $v = 2$ м/с $q_m = 0,35$ кг/(м²·ч), а при $v = 4$ м/с, $q_m = 0,48$ кг/(м²·ч), т. е. по сравнению со скоростью в 1 м/с возрастает на 45%.

Глава 7. ОСНОВНЫЕ СТАДИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

§ 7.1. Экономичность технологического процесса и его связь с качеством продукции и производительностью

Техника и экономика неразрывно связаны между собой. Каждое эффективное мероприятие, направленное на совершенствование техники, улучшает экономические показатели и, в первую очередь увеличивает производительность труда и снижает издержки производства.

Увеличение объемов выпускаемой продукции, расширение ассортимента за счет освоения производства новых, эффективных материалов и изделий, постоянное совершенствование технологии, повышение степени механизации и автоматизации производственных процессов, концентрация производства, рост производительности труда и улучшение основных технико-экономических показателей — все это связано с непрерывным техническим прогрессом в промышленности строительных материалов.

Основные направления современного технического прогресса в этой отрасли предусматривают: 1) широкое развитие и внедрение автоматизации производства на базе технологических разработок по созданию управляемых технологических процессов, внедрение автоматизированных линий; 2) переход от периодического к непрерывному технологическому процессу; 3) создание поточных методов производства, внедрение которых обеспечивает увеличение объемов производства, улучшение условий и рост производительности труда, создание предпосылок для ритмичной работы предприятия; 4) внедрение высокопроизводительного оборудования, модернизация имеющегося оборудования, интенсификация производственных процессов; 5) широкая химизация производства, предусматривающая химическую интенсификацию процессов на всех технологических переделах с одновременным повышением качества готовой продукции на основе разработки материалов с заданными свойствами.

Основными и наиболее прогрессивными принципами организации технологического процесса, принятого в настоящее время во всех отраслях промышленности строительных материалов, является поточность производственного процесса с применением гибких технологий, предусматривающих возможность быстрого изменения номенклатуры выпускаемой продукции. Поточность должна обеспечить более полное использование оборудования, применение комплексной механизации и автоматизации процессов. При поточности производства должна быть: 1) строгая ритмичность процессов и синхронизация длительности циклов на каждом рабочем посту; 2) непрерывность потока.

Ритмичность предусматривает безусловное соблюдение времени на выполнение отдельного цикла, предусмотренных технологическими картами. Синхронизация заключается в расчленении операций по отдельным постам таким образом, чтобы время нахождения изделий на этих постах совпадало. Иногда это время может быть кратно времени операции, выполняемой на одном посту. В этом случае последующий технологический передел обеспечивается несколькими постами, выполняющими предыдущую технологическую операцию. Так, при производстве железобетонных изделий ритм заталкивания вагонеток в щелевую пропарочную камеру составляет 20 мин, а операция по формованию этого изделия — 10 мин. Тогда для обеспечения технологических циклов последующего процесса — пропаривания — необходимо наличие двух формовочных линий, обеспечивающих предыдущую операцию — формование.

Непрерывность потока при передаче изделий от поста к посту без промежуточного складирования или выдерживания позволяет освободить производство от дополнительных операций по транспортированию и лучше использовать производственные площади.

В некоторых случаях предварительное выдерживание сырья или полуфабриката предусмотрено технологией. Даже и в этом случае часто можно ввести дополнительные (но всегда экономически и технологически обоснованные) операции, позволяющие исключить этот процесс. Например, на многих керамических заводах практиковалось «вылеживание» глины для ее лучшего набухания, равномерного увлажнения и диспергирования. Сейчас от этой операции на большинстве предприятий отказались, применяя двухступенчатое увлажнение, пароувлажнение и т. п., дающие не только большой эффект, но и сокращающие производственный цикл подготовки сырья.

При разработке технологического процесса следует также стремиться к организации прямоочной последовательности операций, без возвратных и встречных передвижений полуфабрикатов или изделий. Перемещение материалов должно по возможности осуществляться наиболее коротким путем.

При выборе и обосновании любого технологического процесса необходимо учитывать его соответствие с требованиями, предъявляемыми как к качеству готового продукта, так и к обеспечению заданной производительности. При этом выбранный технологиче-

ский процесс должен быть проведен с минимальными затратами материала и труда.

Под *качеством продукции* понимают совокупность свойств, определяющих пригодность продукции для использования по назначению. Для строительных материалов такими свойствами являются прочность, плотность, степень точности размеров изделий, теплопроводность, морозостойкость, стойкость по отношению к действию воды, агрессивных жидкостей и газов и т. п.

Качество является сложной технико-экономической категорией, которое чрезвычайно неустойчиво. Оно подвержено влиянию множества технических, организационных и экономических факторов. Так, отдельные показатели качества строительных изделий претерпевают изменения под влиянием окружающей среды. Например, увлажнение наружных ограждающих конструкций из ячеистого бетона приводит к росту теплопроводности. Это, в свою очередь, ухудшает температурно-влажностный режим в помещениях и снижает уровень комфорта. Дальнейшая эксплуатация водонасыщенного бетона в условиях попеременного замораживания и оттаивания вызывает деструкцию материала и снижает одно из основных его свойств — прочность. Технические мероприятия по предотвращению возможного увлажнения конструктивными (наружная облицовка, нанесение водонепроницаемых покрытий и т. п.) или технологическими способами (создание плотного поверхностного слоя, гидрофобизация и т. п.) связаны с удорожанием продукции, иногда довольно значительным.

Из всего сказанного следует, что качество должно рассматриваться с технических (прочность, плотность и т. д.), социальных (в данном случае комфортность) и обязательно экономических позиций. Последнее связано как с техническими, так и социальными требованиями к качеству.

Расчет экономичности варианта технологического процесса должен включать учет как единовременных, так и эксплуатационных затрат.

В соответствии с существующей методикой экономических расчетов оптимальным решением будет такое, при котором будут минимальны приведенные затраты

$$П = C_i + E_n K_i \rightarrow \min,$$

где P — приведенные затраты; C_i — себестоимость продукции за год по i -му варианту; E_n — отраслевой нормативный коэффициент эффективности; K_i — капитальные вложения по i -му варианту.

Коэффициент эффективности есть отношение себестоимости продукции к капитальным вложениям. Себестоимость продукции представляет собой совокупность затрат предприятия, связанных с производством и реализацией продукции. Она включает в себя затраты на основные и вспомогательные материалы, топливо и энергию, зарплату, возмещение износа оборудования, зданий и сооружений и ряд других расходов.

В состав капитальных вложений включаются затраты на строительные-монтажные работы, приобретение всех видов оборудования, инструмента и инвентаря, входящего в состав основных фондов, на проектно-изыскательские и другие работы и затраты, связанные со строительством и вводом в действие производственных мощностей.

Любой технологический процесс может быть рациональным только для конкретных условий — для определенной продукции и объема производства. Даже незначительное изменение в технологическом процессе может вызвать перераспределение издержек производства: то, что ранее было выгодным, может стать нерациональным и наоборот. Так, при производстве ячеистых бетонов автоклавного твердения проводят домол песка для увеличения его удельной поверхности до 2000 ... 2300 см²/г. Применение в качестве кремнеземистого компонента вместо песка зол ТЭЦ позволяет исключить не только операции по домолу песка, но и заменить автоклавный процесс пропариванием изделий. Таким образом, при сохранении качества изделий (совокупности свойств, определяющих пригодность продукции для использования по назначению) замена сырья привела к исключению одной технологической операции и замене более дорогостоящей операции (запарка) на менее дорогостоящую — пропарку. Все это, несомненно, повлияло на сокращение издержек производства.

Экономичность процесса в целом тесно связана с рациональной организацией отдельных технологических операций. Так как каждая технологическая операция, как правило, является совокупностью двух или даже нескольких элементарных процессов (механических, гидродинамических, тепловых и т. д.), то правильное приложении законов, описывающих эти процессы влияет на рациональное и экономичное проведение конкретной технологической операции.

В изложенном ниже материале сделана попытка рассмотреть стадии технологического процесса с точки зрения совокупности отдельных элементарных процессов.

§ 7.2. Подготовительные процессы

Подготовительные процессы сопутствуют производству строительных материалов практически любого вида. Основная задача подготовительных процессов заключается в раскрытии потенциальных возможностей исходного сырья. В зависимости от вида подготавливаемого сырья и специфичности вырабатываемого готового продукта подготовительные операции носят различный характер. На рис. 7.1 приведена классификация подготовительных процессов.

Измельчение и классификация исходных компонентов — один из наиболее распространенных подготовительных процессов в производстве строительных материалов. Основные законы измельчения, а также принципиальные схемы аппаратов для дробления, мола и механической классификации были рассмотрены в гл. 3.

Методика подбора оборудования и основные принципы технологических расчетов, связанных с ним, а также принципы подбора зернового состава исходных компонентов изложены ниже.



Рис. 7.1. Классификация подготовительных процессов

Предварительная тепловая обработка сырья для различных производств различается по виду обработки. Так, в железобетонной промышленности предварительная обработка чаще всего заключается в подсушке песка (редко — крупного заполнителя) и в размораживании крупного и мелкого заполнителя в зимнее время. Тепловые процессы в этом случае мало чем отличаются от обычных тепловых процессов технологической обработки материала и в этом разделе не рассматриваются.

Предварительная тепловая обработка сырья в керамических производствах заключается в сушке, иногда дегидратации или обжиге глины на шамот. Если сушка глины в зависимости от требуемой и исходной влажности сырья может применяться практически во всех керамических производствах, то применение дегидратированной * или шамотированной (обожженной) глины ограничивается в основном производством специальных (например, огнеупорных) видов керамики. Законы тепло- и массопереноса в этих случаях те же, что и при основных технологических процессах сушки и обжига керамики и поэтому в этом разделе также не рассматриваются.

Перемешивание (сухое или мокрое) связано с гомогенизацией исходного сырья с различного рода добавками. На стадии подготовки сырья часто подвергают химической или физико-химической обработке, чаще всего путем введения соответствующих добавок. Введение добавок направлено на придание исходному сырью повышенной активности, облегчающей и ускоряющей какую-либо основную технологическую операцию. Среди этих добавок имеются ото-

* Дегидратацией глины называют процесс удаления кристаллизационной влаги из глинистых минералов.

щающие, уплотняющие, порообразующие, минерализующие, гидрофобизирующие и гидрофилизующие, коагулирующие и т. д. Эти добавки улучшают структуру создаваемого материала, упрочняют или, наоборот, разрывают внутренние связи, способствуют формированию свойств масс с заданными показателями.

Для получения в объеме массы одинаковых свойств необходимо произвести тщательное распределение этих добавок во всем объеме. Основные закономерности перемешивания сухих и влажных масс рассматриваются в разделах, связанных с основными технологическими процессами.

Измельчение и классификация исходного сырья. Дробление или помол с последующим разделением полученного материала по крупности продукта осуществляют с целью получить материал: 1) заданного зернового состава, обеспечивающий требуемую плотность исходной композиции; 2) такой максимальной крупности, которая соответствовала бы конструктивным элементам изделия; так, при производстве железобетонных балок, колонн максимальная крупность щебня не должна превышать $\frac{3}{4}$ минимального расстояния между арматурными стержнями, а для плит перекрытий — не более $\frac{1}{2}$ наименьшего размера по толщине плиты; 3) требуемой удельной поверхности для тонких порошков, определяющей как пластично-вязкие свойства формируемых масс, так и химическую активность сырья на последующих стадиях переработки.

Основные принципы подбора зернового состава исходного сырья. Основным требованием к сырью в части зернового состава является обеспечение возможности получения скелета требуемой плотности. Для конструктивных материалов сырье подбирают по максимальной плотности, для теплоизоляционных, наоборот, возможно большей пористости. Во всех случаях необходимо владеть соответствующим аппаратом, позволяющим быстро и надежно подбирать соотношения и расходы различных фракций. Влияние зернового состава на плотность упаковки тел шарообразной или приближающейся к ней формы теоретически и экспериментально раз-

Таблица 7.1. Объем пустот при различных системах укладки шаров

Укладка	Число контактов с соседними шарами	Пустотность, %
Кубическая	6	47,64
Простая шахматная	8	39,55
Двойная шахматная	10	30,2
Пирамидальная	12	25,95
Тетрагональная	12	25,95

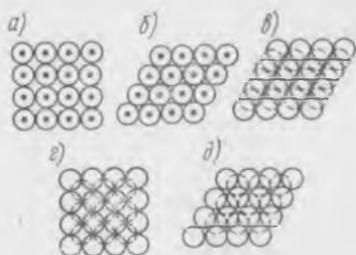


Рис. 7.2. Типы шаровой упаковки:

а — кубическая; б — простая шахматная; в — двойная шахматная; г — пирамидальная; д — тетрагональная

рабатывалось многими исследователями, так как это имеет большое значение для различных областей техники. Рассмотрение этого вопроса удобнее всего начать с идеализированного представления о шарообразной форме частиц. Для шаров одного диаметра выполнены геометрические расчеты при пяти различных вариантах упорядоченной укладки (рис. 7.2 и табл. 7.1).

Таким образом, теоретическую пористость при укладке шаров можно связать с числом контактов (рис. 7.3).

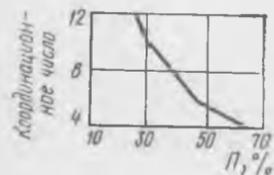
В зависимости от способа укладки шаров угол θ , образованный между линиями, соединяющими центры соприкасающихся шаров, будет изменяться от 60 до 90°. Тогда, пользуясь геометрическими построениями, можно подсчитать соответственную плотность упаковки

$$\rho_0 = \pi / [6(1 - \cos \theta) \sqrt{1 + 2 \cos \theta}], \quad (7.1)$$

откуда пустотность (%)

$$П = (1 - \rho_0) 100. \quad (7.2)$$

Рис. 7.3. Зависимость пористости $П$ от координационного числа



Эксперименты показывают, что даже при энергичном воздействии на шары плотные упаковки с координационными числами 12 не реализуются и образуются упаковки, в которых шары имеют в основном 7...9,5 контактов с соседями и лишь около 25% шаров имеют 12 контактов. В результате этого вместо теоретически достижимой пористости 26% реальная пористость шаров составляет около 37%. В табл. 7.2 приведена зависимость реальной плотности упаковки шаров от координационных чисел (по данным И. О. Кайнарского). Итак, зная количество контактов шаров даже в геометрически неправильной упаковке можно по графику рис. 7.3 рассчитать пористость, при этом ошибка не будет превышать 5...6%, что вполне приемлемо для практических целей.

Таблица 7.2. Координационные числа и плотность упаковки шаров

Способ укладки шаров	Шары, имеющие контакты, %, с соседними в количестве от общего числа шаров									Среднее координационное число	Плотность, %	
	4	5	6	7	8	9	10	11	12		экспериментальная	расчетная
Свободная за сыпка	0,7	8,6	26,8	36,2	22,1	5,3	0,2	—	—	6,92	55	56
Утряска до максимальной плотности	—	0,9	5,8	12,9	15,6	12,9	10,8	15,1	26,0	9,51	63	66
Послойная утряска	0,1	0,8	5,0	16,7	20,6	19,8	13,3	12,4	12,3	9,14	64	65

Таблица 7.3. Теоретическая пустотность многофракционной смеси

Наименование	Шары				
	первичный (вмещающий)	вмещаемые			
		вторичный	третичный	четвертичный	пятиричный
Радиус шара	R	$0,414R$	$0,225R$	$0,175R$	$0,117R$
Пустотность смеси, %	25,95	20,7	19,0	15,8	14,9

Если в промежутки между большими шарами (вмещающие) поместить шары (вмещаемые) меньшего размера, точно вписывающиеся в размер пустот, образованных большими шарами, то плотность упаковки может быть значительно увеличена. В табл. 7.3 приведены расчетные данные по пустотности и диаметрам вмещаемых шаров для пирамидальной и тетрагональной упаковок.

Расчеты показывают, что дальнейшее вмещение шаров не приводит к значительному увеличению плотности, поэтому пустотность около 15% можно считать минимальной при теоретической укладке шаров.

Различают два основных принципа подбора упаковок, эффективно повышающих плотность смеси: 1) «непрерывные» укладки, характеризующиеся заполнением объема зернами всех размеров (см. табл. 7.3); 2) «прерывистые» укладки, при которых между зернами заданных фракций промежуточные фракции отсутствуют. При этом зерна самой крупной фракции образуют скелет, пустоты которого замещаются не максимально вмещающимися зернами, а зернами, имеющими меньший размер.

Исследователями предложены графики и расчетные формулы для определения оптимального соотношения фракций при непрерывной укладке. Удобна для этих целей формула Андерсена

$$P = 100 (d/D)^q, \quad (7.3)$$

где P — содержание фракций с размером зерна меньше d , %; D — максимальный размер зерна, мм; q — показатель степени, определяемый экспериментально для данного типа смеси и условий упаковки, зависящий от формы зерен, характера их поверхности, и обычно $q = 0,33 \dots 0,5$.

Характер интегральных кривых распределения для мелких порошков приведен на рис. 7.4.

Использование сырья с зерновым составом, рассчитанным

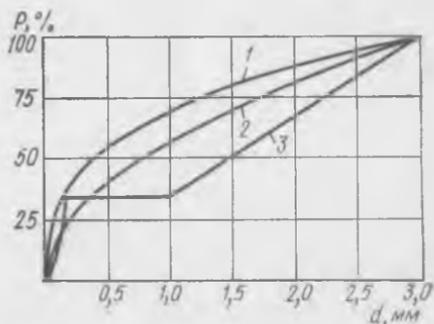


Рис. 7.4. Различные варианты зернового состава с плотной упаковкой:

1 — непрерывный (по Андерсену), $q=0,5$; 2 — то же, $q=0,3$; 3 — ступенчатый двухфракционный (идеальный)

по приведенной формуле, позволяет получать упаковки с пористостью до 20%. Однако на практике в дробильных и помольных агрегатах даже с последующим рассевом трудно получить и подобрать требуемый зерновой состав.

В этих случаях, особенно в керамической промышленности, применяют прерывистые уклады. Основные принципы подбора таких укладок с максимальной плотностью:

1. Размер зерен каждой следующей фракции должен быть значительно меньше размера пустот, образуемых предыдущей фракцией. Для двухфракционных смесей повышение плотности упаковки растёт с увеличением соотношения их размеров. Однако данные, приведенные в технической литературе, по требуемому соотношению D/d неоднозначны. В одних источниках говорится, что при увеличении D/d до 6 плотность смесей повышается примерно на 20%, а затем при дальнейшем увеличении отношения диаметров незначительно (на 3...4%) падает. Другие исследователи утверждают, что оптимум отношений диаметров лежит в пределах 8...10 и в дальнейшем при его увеличении асимптотически возрастает. Во всяком случае, можно считать, что соотношение диаметров должно лежать в пределах 6...10.

2. Количественное соотношение крупной и мелкой фракций должно находиться в пределах 65:35, а для трехфракционных систем в пределах 55:30:15, при этом минимальная пористость для вибрированных двухфракционных смесей составляет 15...16%, а для трехфракционных — 9...10%. При количестве мелкой фракции больше оптимального наблюдается раздвижка скелета крупной фракции; уменьшение мелкой фракции против оптимума приводит к незаполненности пустот скелета крупной фракции. В обоих случаях пустотность смеси возрастает.

Принцип подбора зернового состава масс по плотности упаковки, играющий существенную роль в различных областях производства строительных материалов, отнюдь не является универсальным. Как в производстве железобетонных изделий, так и в технологии керамики зачастую приходится отступать от этого принципа, учитывая возможность расслаивания готовых бетонных смесей с большим содержанием крупных фракций заполнителя при транспортировке, заметное облегчение формуемости «замельченных» бетонных и керамических смесей, улучшение спекаемости керамики с ростом содержания тонких фракций и целый ряд других производственных и эксплуатационных факторов.

Например, в бетоне при наибольшей крупности заполнителя 40 мм при непрерывной укладке следовало бы применять сочетание трех фракций: 0,14...0,315; 2,5...5 и 20...40 мм, а при наибольшей крупности заполнителя 20 мм трудно было бы вообще подобрать фракции с нужным соотношением размеров.

Кроме того, для приведенной выше градации размеров фракций практически невозможно использовать заполнитель промежуточных фракций, получаемый дроблением природного камня. Поэтому в технологии бетона применяют полупрерывистый зерновой состав

при подборе фракций крупного и мелкого заполнителя, без одной-двух промежуточных фракций. В табл. 7.4 и 7.5 приведены рекомендуемые соотношения отдельных фракций мелкого и крупного заполнителя для бетонов.

Анализируя данные таблиц, можно заметить, что как размеры рекомендуемых фракций, так и их количество несколько отличаются от теоретических данных табл. 7.3 и основных принципов подбора прерывистых укладок в основном по причинам, изложенным выше.

Аналогичный вывод можно сделать и рассматривая реальные зерновые составы

Таблица 7.4. Рекомендуемый зерновой состав фракционированного песка для бетонов

Фракция	Размер отверстий контрольных сит, мм	Полные остатки на ситах, %	
		1,25 мм	0,63 мм
Крупная	5	—	—
	2,5	20 ... 50	0 ... 40
	1,25	100	50 ... 70
	0,63	—	100
Мелкая	0,63	30 ... 50	—
	0,315	50 ... 80	40 ... 60
	0,14	85 ... 95	85 ... 95

Таблица 7.5. Рекомендуемые соотношения фракций крупного заполнителя для бетонов

Наибольшая крупность	Количество фракций	Содержание фракций, %, при размере зерен, мм			
		5 ... 10	10 ... 20	20 ... 40	40 ... 70
20	2	45 ... 60	40 ... 55	—	—
40	3	25 ... 30	20 ... 30	40 ... 55	—
70	4	20 ... 25	15 ... 25	15 ... 20	35 ... 50

смесей при производстве керамических материалов. Для тонкозернистых керамических масс весьма затруднительно получать зерновые составы порошков с высокой плотностью упаковки. Для этого потребовалось бы тщательное фракционирование и регулирование соотношения частиц с размерами от десятков до долей микрона. Такой задачи технологи, как правило, не ставят. Плотность полуфабриката, например, из многосамотных масс чаще всего колеблется в пределах 25...45%, а дальнейшее уплотнение достигается при обжиге. На рис. 7.5 показаны области теоретических и практических зерновых составов смесей при производстве шамотных огнеупоров. Из приведенных данных следует, что и в этом случае реальные составы смесей отличаются от теоретически рассчитанных.

Таким образом, при подборе оптимальных зерновых составов смеси следует руководствоваться следующими соображениями: 1) реальные смеси по своему составу должны приближаться к теоретически рассчитанным; при этом в зависимости от исходного зернового состава сырья необходимо руководствоваться общими

принципами получения непрерывных, прерывистых или комбинированных плотнейших упаковок; 2) состав смеси должен назначаться с учетом технологических требований, предъявляемых к ним в процессе дальнейшей переработки, — формуемости, спекаемости, нерасплаиваемости и т. д.; 3) зерновой состав исходной смеси должен обеспечивать получение материала с заданными эксплуатационными свойствами, определяемыми

пористостью готового изделия — морозостойкость, газопроницаемость, теплопроводность и т. п.; 4) при назначении состава смеси необходимо учитывать экономический фактор, включающий энергетические затраты и трудоемкость процессов измельчения и фракционирования исходного сырья, транспортные расходы, объемы неиспользуемых по прямому назначению отходов и т. п.

Выбор дробильно-помольного оборудования. В производстве основных видов строительных материалов дробильные и помольные установки максимально приближены к карьерам и технологические процессы по измельчению и классификации сырья находятся в ведении специали-



Рис. 7.5. Области максимального уплотнения трехфракционных порошковых масс:

1 — оптимальный состав идеальных порошковых систем; 2 — типичные реальные составы

стов горнодобывающего и горно-обогачительного профиля. Однако на крупных стройках, имеющих мощные бетоносмесительные узлы, карьерное хозяйство нередко находится в сфере деятельности специалиста-технолога по строительным материалам. Кроме того, на многих предприятиях, особенно по производству керамики, ячеистых бетонов, силикатного кирпича, некоторых видов теплоизоляционных материалов, а также на ряде железобетонных заводов имеются свои дробильно-помольные отделения. Поэтому технологу нередко приходится сталкиваться с организационно-техническими вопросами, связанными с работой этих отделений.

Технологические схемы и компоновка оборудования определяются характером измельчаемого сырья, требованиями к готовому продукту, номенклатурой выпускаемого оборудования, мощностью и назначением предприятия. Схемы должны быть «гибкими» и обеспечивать возможность варьирования характеристик исходного и готового продукта за счет изменения режимов работы оборудования.

По назначению различают дробильно-помольные установки, используемые для получения:

1) щебня, применяемого в производстве железобетонных изделий, силикатных расплавов, обжига на известь, полуводный гипс и т. п.; 2) дисперсных порошков, используемых в качестве вяжущих материалов и добавок к ним, как наполнителей при производстве

ячеистых бетонов, строительных пластмасс и т. п.; 3) в керамических производствах для подготовки глины и тонкопомолотых компонентов керамических масс.

Вне зависимости от дальнейшего назначения щебня основными исходными данными для технологических расчетов установок первой группы являются производительность, максимальный размер D_{\max} дробимого материала и предел прочности при сжатии σ , наибольший и наименьший размеры получаемого щебня d_{\max} и d_{\min} .

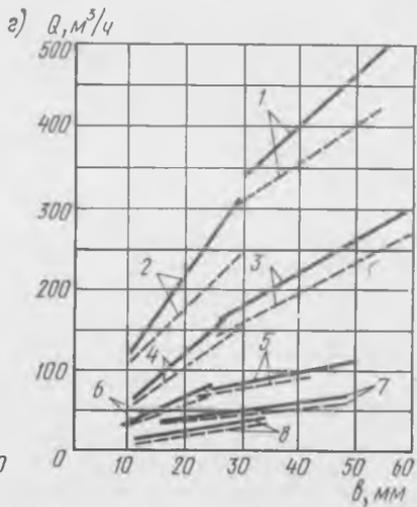
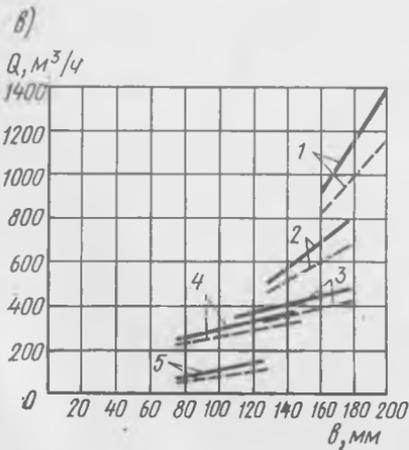
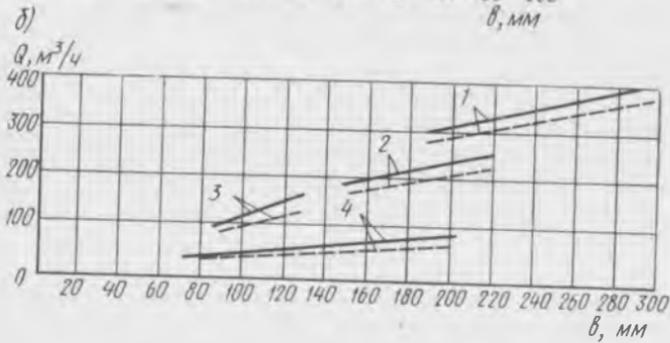
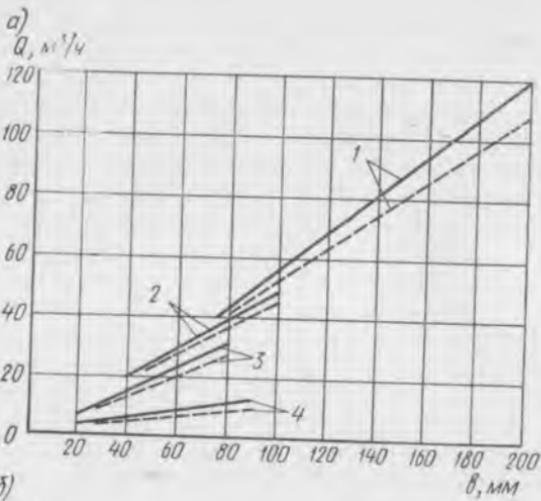
Технологические схемы узлов могут быть одно-, двух-, трех- и четырехстадийными, с открытым или замкнутым (повторным дроблением фракций крупнее заданных) циклом работы отдельных дробильных машин. При одностадийном дроблении измельчение производится в одной машине от размеров исходного камня до требуемых размеров щебня; при двухстадийном — в двух последовательно установленных машинах и т. д. Одностадийные схемы используются при небольших объемах производства и небольших степенях дробления — 3 ... 5 и в производстве щебня для бетона применяются редко, так как при этом трудно обеспечить нужный состав продукта. В этих случаях чаще всего применяют двух- или трехстадийную схему.

Рассмотрим в качестве примера методику подбора дробильно-сортировочного оборудования по производству щебня для бетона. Пусть исходными данными для расчета являются: заданная производительность узла средней мощности $Q_{\text{зад}}$, исходное сырье — гранит с наибольшим размером куском D_{\max} , максимальный и минимальный размеры щебня d_{\max} и d_{\min} ; степень измельчения $i = D_{\max}/d_{\min}$ больше рекомендуемой для отдельных дробилок. Рекомендуемые степени измельчения для различных типов дробилок:

Тип дробилки	Степень измельчения
Щековые и конусные крупного дробления	3 ... 5
Конусные среднего и мелкого дробления:	
в открытом цикле	3 ... 5
в закрытом цикле	4 ... 7
Роторные и молотковые дробилки	3 ... 12

Исходя из этих данных и учитывая среднюю по производительности мощность проектируемого узла, принимают двухстадийную схему дробления.

В промышленности строительных материалов для дробления горных пород используют щековые, конусные, молотковые, роторные и валковые дробилки. Щековые и конусные дробилки применяют, как правило, для получения щебня из крепких и прочных пород; дробилки ударного действия и валковые — для дробления мягких неабразивных пород. Щековые и конусные дробилки выпускают специально для крупного, среднего и мелкого дробления. Дробилки ударного действия более универсальны и, обладая высо-



кой степенью измельчения, могут перерабатывать довольно крупные камни в достаточно мелкий продукт. Кроме того, их металло- и энергоемкость меньше щековых и конусных дробилок. Однако при дроблении прочных абразивных пород их не применяют вследствие большого износа рабочих органов.

Исходя из вышеизложенного в нашем случае могут быть использованы как щековые, так и конусные дробилки. В такой ситуации обычно рассматриваются оба варианта, а затем по полученным при расчетах показателям — стоимости дробильного оборудования, суммарной удельной энергоемкости, коэффициенту загрузки оборудования — выбирают лучший вариант.

Технологический расчет оборудования ведут поэтапно в такой последовательности:

1. По соответствующим справочникам подбирают тип дробилки первой стадии дробления по расчетной производительности и размеру загрузочного отверстия

$$Q_1 = Q_{\text{зад}} K_H / K_{\text{и}}, \quad (7.4)$$

где $Q_{\text{зад}}$ — заданная производительность узла; K_H — коэффициент неравномерности подачи материала, обычно $K_H = 1,1 \dots 1,5$; $K_{\text{и}}$ — коэффициент использования дробилки по времени, $K_{\text{и}} = 0,95$.

Марку дробилки выбирают таким образом, чтобы паспортный размер ее загрузочного отверстия B был несколько больше D_{max} , а номинальная производительность — несколько больше Q_1 .

2. Определяют размер выходной щели b_1 . Выходная щель дробилки первой стадии должна быть минимально возможной для обеспечения расчетной производительности. Она определяется по графикам (рис. 7.6).

3. Рассчитывают зерновой состав продуктов после первой стадии дробления, пользуясь графиками типовых характеристик соответствующих машин (рис. 7.7).

В табл. 7.6 приведены данные расчета зернового состава щебня. В качестве примера ширина разгрузочной щели щековой дробилки принята 60 мм.

Для получения содержания (%) каждой фракции в продукте дробления сначала вычисляют отношение d_{max}/l_1 . Затем по графику (рис. 7.7) определяют полные остатки на ситах и производят подсчет частных остатков для каждой фракции.

4. Подбор дробилок второй стадии дробления осуществляют

Рис. 7.6. Зависимость производительности щековых и конусных дробилок от величины выходной щели b :

a — щековые дробилки со сложным качанием щеки; 1 — СМ-16Д; 2 — СМ-741; 3 — СМ-166А; 4 — СМ-182; b — щековые дробилки с простым качанием щеки; 1 — 1500×2100; 2 — 1200×1500; 3 — 900×1200; 4 — 600×900; β — конусные дробилки крупного дробления; 1 — ККД-1500; 2 — ККД-1200; 3 — ККД-900; 4 — ККД-700; 5 — ККД-500; γ — конусные дробилки среднего дробления; 1 — КСД-Б-2200; 2 — КСД-А-2200; 3 — КСД-Б-1750; 4 — КСД-А-1750; 5 — КСД-Б-1200; 6 — КСД-А-1200; 7 — КСД-900Т; 8 — КСД-800Т; — — — мягкие породы; — — — средней твердости

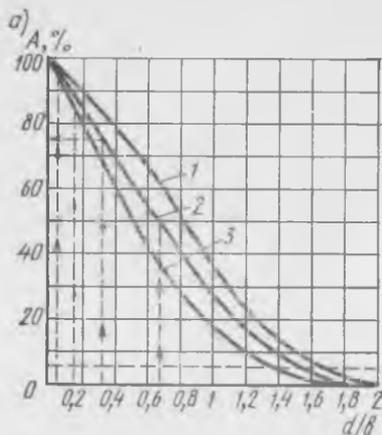
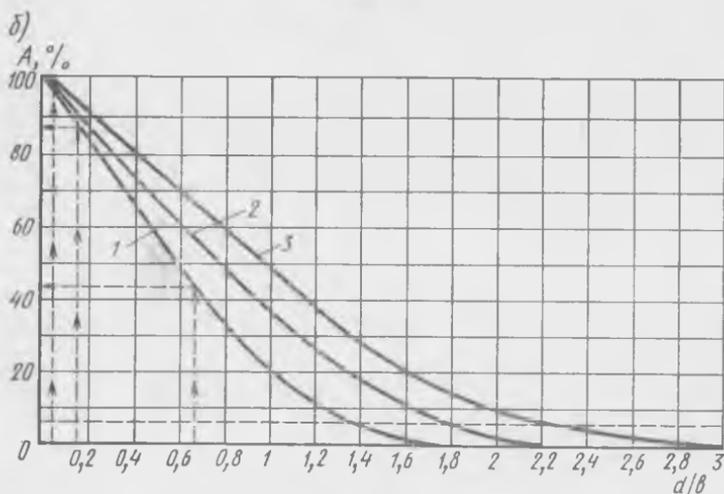


Рис. 7.7. Типовые характеристики крупности продуктов дробления:

a — щековых дробилок; 1 — для твердых пород; 2 — то же, средней твердости; 3 — то же, мягких; *б* — конусных дробилок для пород средней твердости; 1 — дробилки крупного дробления серии ККД; 2 — то же, среднего дробления КСД; 3 — то же, мелкого дробления КМД (*d/δ* — крупность в долях ширины разгрузочной щели)



аналогично. При этом требуемую производительность определяют по формуле

$$Q_{II} = cQ_I, \quad (7.5)$$

где Q_I — производительность, рассчитанная по формуле 7.3; c — доля продукта, требующего повторного дробления. Так, если максимальная крупность готового продукта не должна превышать 40 мм, то для рассмотренного в табл. 7.6 примера для щековой дробилки c составит 0,6, а для конусной — 0,44.

Предельная крупность загружаемого камня D'_{max} будет равна максимальному размеру щебня, выходящего из дробилки первой стадии дробления

$$D'_{max} = l_1 \varphi, \quad (7.6)$$

где φ — коэффициент, который соответствует пересечению кривой зернового состава с осью абсцисс (рис. 7.7). В рассмотренном вы-

Таблица 7.6. Пример расчета зернового состава щебня по типовой характеристике дробилки

Фракции, мм	d/b_1	Полные остатки		Частные остатки, %	
		Дробилки		Дробилки	
		щековая	конусная	щековая	конусная
0 ... 3	$3/60=0,05$	97,5	96	$100-97,5=2,5$	$100-96=4$
3 ... 10	$10/60=0,167$	92	86	$97,5-92=5,5$	$96-86=10$
10 ... 20	$20/60=0,333$	77	70	$92-77=15$	$86-70=16$
20 ... 40	$40/60=0,667$	50	44	$77-50=27$	$70-44=26$
более 40	—	—	—	60	44

ше примере он составит 1,8 как для щековой, так и для конусной дробилок, что при $l_1=60$ мм дает $D'_{\max}=108$ мм.

При затруднениях в подборе дробилки по допустимой крупности загружаемого материала в целях уменьшения φ разрешается точку пересечения кривой брать не с осью абсцисс, а с линией допустимого 5%-ного «негабарита» (горизонтальный пунктир на рис. 7.7). В этом случае в поступающем на дробление материале будет 5% зерен, имеющих размер больше, чем подсчитанный по формуле (7.6). Тогда для щековой дробилки $\varphi=1,5$ и $D_{\max}=90$ мм.

5. При определении размера выходной щели дробилок второй стадии исходят из необходимости получения щебня с крупностью не выше заданной d_{\max} . Тогда не потребуется третьей стадии или повторного дробления в дробилках второй стадии. Из соотношения (7.4) можно определить требуемый размер щели. Он будет $l_2=d_{\max}/\varphi$. Если производить щебень с допустимым 5%-ным «негабаритом», то φ находится так, как описано выше. По стандарту в продукте дробления допускается не более 5% зерен крупностью менее 3 мм (пыли). Поэтому, если по расчету содержание пыли в щебне превышает 5%, то необходимо увеличить размер выходной щели. Для проверки этого положения находят соответствующее $\varphi=3/l_2$ и по графику (см. рис. 7.7) определяют полный остаток на сите 3 мм. Если он меньше 95%, то по линии пересечения ординаты, соответствующей 95 ... 97% (т. е. менее 5% частного остатка на сите 3 мм), находят требуемое соотношение d/l_2 , что при известном $d=3$ мм даст нужный размер выходной щели l_2 .

6. По методике, описанной в п. 3, подсчитывают зерновой состав продуктов дробления второй стадии. При этом особое внимание обращают на количество фракции, более заданной наибольшей крупности щебня. Если этой фракции более 5%, то ее надо повторно измельчать, т. е. принять работу дробилки в замкнутом цикле. Тогда необходимо проверить достаточность производительности дробилки с учетом переработки «возврата»

$$Q_{II}^* = Q_{II} / (1 - q), \quad (7.7)$$

где Q_{II} — первоначальная загрузка дробилки; q — доля потока щебня, направляемого на повторное дробление.

7. Производят подсчет суммарного зернового состава щебня, полученного на обеих стадиях дробления. Суммарный зерновой состав любой фракции

$$\gamma_{\Sigma} = \gamma_1 + \frac{c}{1-q} \gamma_2, \quad (7.8)$$

где γ_1 — зерновой состав щебня из дробилки первой стадии, %; c — доля продукта, выходящего из дробилки первой стадии, требующего повторного дробления; q — то же, выходящего из дробилки второй стадии и направляемого для повторного дробления в замкнутом цикле; γ_2 — зерновой состав щебня из дробилки второй стадии, %.

Если в продукте дробления после второй стадии содержится более 5% фракции выше d_{\max} , то после дробилки для отделения этой фракции материал необходимо подвергнуть классификации. Расчет грохотов состоит в определении полезной площади сит, выборе марки грохота и их количества.

Поскольку в приведенном примере следует отделить только одну фракцию размером более d_{\max} , после дробилки нужно поставить один грохот.

Производительность грохотов при сухой сортировке

$$Q = \delta A q_0 K_1 K_2, \quad (7.9)$$

где Q — количество материала, требующего повторного дробления; δ — коэффициент, зависящий от вида дробимого материала и угла наклона грохота; для щебня при наклонном грохоте $\delta = 0,4$; A — площадь сита; q_0 — производительность 1 м² сита данных размеров ячеек (удельная производительность); K_1 — коэффициент, зависящий от процентного содержания в исходном материале зерен, размер которых меньше ячейки сита; K_2 — коэффициент, зависящий от процентного содержания в продукте, прошедшем через сито, зерен размером менее половины ячейки сита. Значения q_0 , K_1 и K_2 приведены на рис. 7.8 и 7.9.

Подсчитав площадь сита $A = Q / (\delta q_0 K_1 K_2)$, по соответствующим справочникам выбирают марку грохота.

В качестве помольных установок для получения тонкодисперсных порошков в промышленности строительных материалов чаще всего используют барабанные, среднеходовые, ударные, вибрационные и струйные мельницы. Как и

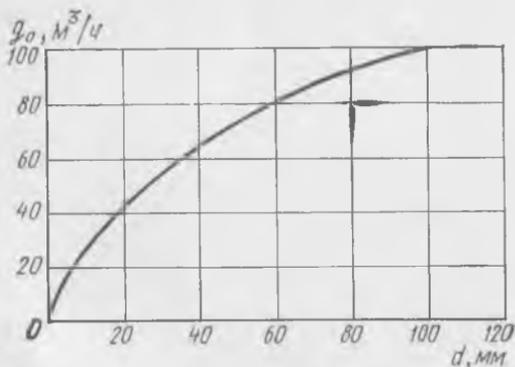


Рис. 7.8. Зависимость удельной производительности сит q_0 от диаметра d ячейки

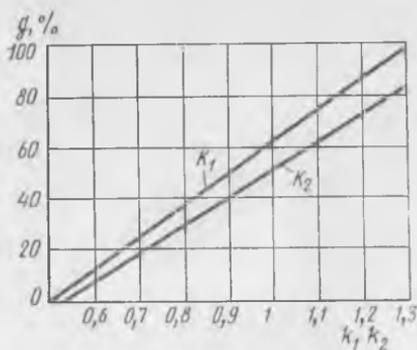


Рис. 7.9. Зависимость коэффициентов k_1 и k_2 от содержания зерен соответствующих классов $g, \%$ (для k_1 — меньше ячейки сита, для k_2 — меньше половины ячейки сита)

для установок первой группы (установки для получения щебня), исходными данными для технологических расчетов их являются заданная производительность, характеристика исходного материала и требуемая тонкость помола. Последняя задается либо удельной поверхностью s , либо процентным остатком на сите 008 (иногда на сите 0074). На рис. 7.10 показана зависимость удельной поверхности s от содержания в готовом продукте зерен размером 0,074 мм.

При многотоннажном производстве для получения тонкодисперсного продукта чаще всего используют барабанные мельницы непрерывного действия. В зависимости от отношения длины барабана L к его диаметру D они подразделяются на шаровые (L/D до 2) и трубные ($L/D=3 \dots 6$). Производительность этих мельниц и удельный расход электроэнергии при помоле зависят от физико-механических свойств размалываемого сырья, размера загружаемых кусков, заданной степени измельчения, способа питания мельницы, удельной массы и соотношения размеров мелющих тел, объема, диаметра и числа оборотов мельницы.

Расчетная производительность мельницы может быть подсчитана по формуле ВНИИЦеммаша

$$Q = 6,45V \sqrt{D} (m/V)^{0,8} q k_{\pi} k_{\text{м}} \quad (7.10)$$

где V — полезный объем мельницы; D — ее внутренний диаметр; m — масса мелющих тел; q — удельная производительность мель-

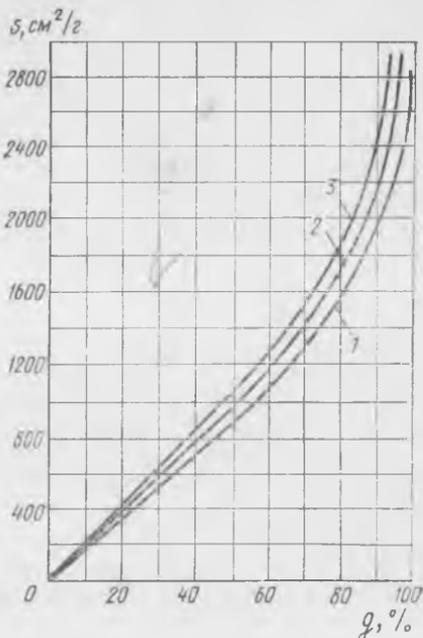


Рис. 7.10. Зависимость удельной поверхности s от содержания q в продукте класса 0,074 мм:

1 — теоретическая кривая, подсчитанная применительно к уравнению Розина — Рамллера; 2 — экспериментальная кривая по сухому измельчению кварца; 3 — то же, мокрому измельчению

ницы (табл. 7.7); k_{Π} — поправочный коэффициент на тонкость помола (рис. 7.11); k_M — коэффициент использования мощности, $k_M=0,9$.

$$m = V\varphi\gamma_n, \quad (7.11)$$

где φ — коэффициент заполнения объема мельницы мелющими телами (для цементных мельниц $\varphi=0,26 \dots 0,32$); γ_n — насыпная плотность мелющих тел.

Таблица 7.7. Удельная производительность мельниц q в т/(кВт·ч) полезной мощности

Материал	Способ помола	
	мокрый	сухой
Клинкер вращающихся печей	—	0,036 ... 0,044
Гранулированный доменный шлак	—	0,035 ... 0,04
Песок кварцевый	—	0,024 ... 0,028
Трепел, опока	—	0,05 ... 0,06
Смесь известняка и глины с сопротивлением размолу:	высоким	0,05 ... 0,07
	средним	0,07 ... 0,09
	низким	0,1 ... 0,15
		0,05 ... 0,06

Качество готового продукта, получаемого при помоле, нельзя оценивать только дисперсностью готового материала. Исследования показали, что необходимо учитывать зерновой состав и форму зерен готового материала (см. § 7.2), а также реакционную способность вновь образованной поверхности. Так, количество химиче-

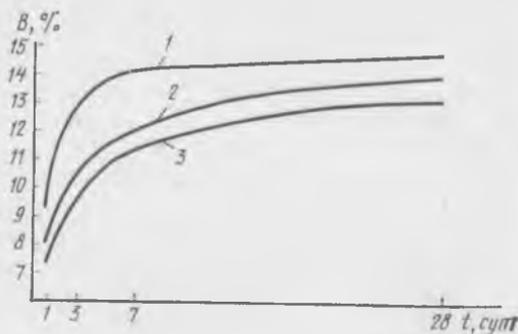
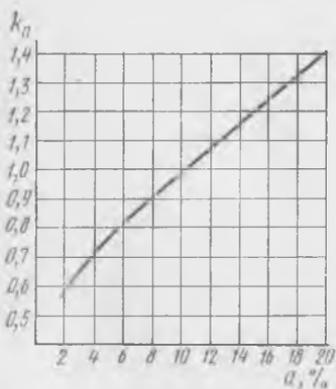


Рис. 7.11. Значения поправочного коэффициента k_{Π} на тонкость помола a (остаток на сите 0,08)

Рис. 7.12. Зависимость количества связываемой воды B для цементов, измельченных в струйной (1), шаровой (2) и гирационной вибромельницах (3)

ски связываемой воды у цементов, полученных в струйных мельницах, на 1,5 ... 2,5% выше, чем у цементов, измельченных в шаровых и гириационных вибромельницах (рис. 7.12).

В керамической промышленности для измельчения сырьевых компонентов используют дезинтеграторные, дифференциальные и дырчатые вальцы, бегуны, шаровые, вибрационные и струйные мельницы. Последние три типа машин применяют для получения тонких порошков из непластичных материалов, например шамота; для этих целей иногда используют и бегуны сухого помола. Различные типы вальцов, а также бегуны применяют сначала для грубого, а затем и тонкого измельчения глин.

Помол глины наряду с повышением однородности состава приводит к разрушению водопрочных оболочек, которые цементируют отдельные зерна глинообразующих минералов. Последнее обстоятельство существенно влияет на улучшение сушильных свойств глиняного сырца. Наличие водонепроницаемой оболочки препятствует созданию гидратной пленки при затворении глины водой и тем самым снижает пластические свойства глиняной массы. При отсутствии водопрочной оболочки на частице глины за счет молекулярных сил образуется гидратная пленка, которая, уменьшая свою толщину во время сушки, способствует возникновению прочных связей между глиняными частицами, повышая трещиностойкость сырца.

Для тонкого измельчения глин применяют гладкие дифференциальные, дырчатые вальцы и бегуны. Степень воздействия этих агрегатов на глиняную массу различна и зависит как от режимов работы агрегата, так и от свойств самой массы. Так, технологическая эффективность обработки массы в гладких дифференциальных вальцах зависит от зазора между валками, соотношения между скоростями вращения валков и влажности обрабатываемой массы. Исследования показали, что уменьшение зазора с 3 до 0,5 мм повышает прочность обожженных образцов с 10 до 35 МПа. Это, по-видимому, объясняется более эффективным обнажением поверхности глинистых минералов, приводящих к созданию гидратных оболочек и, как следствие, к повышению трещиностойкости сырца при сушке, а также повышению плотности сырца за счет удаления воздушных прослоек. Установлено также, что степень измельчения и прочность сырца возрастают с увеличением влажности массы до формовочной (рис. 7.13). Глиняные массы, обработанные в дырчатых вальцах, повышают прочность сырца в 1,5 раза, а на бегунах — более чем в 2 раза.

Для получения тонких порошков из непластичных материалов при большой производительности применяют машины непрерывного действия, чаще всего трубные и шаровые мель-

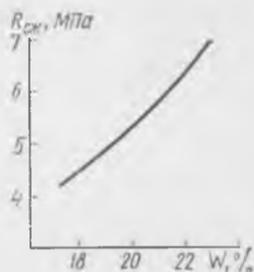


Рис. 7.13. Зависимость прочности сырца $R_{сж}$ от влажности W глиняной массы, обработанной в дифференциальных вальцах

ницы. При небольших объемах производства, особенно при производстве огнеупорной и технической керамики, используют помольные машины периодического действия. Хотя по своей производительности и экономичности эти машины явно уступают непрерывнодействующим, их применение в промышленности обусловлено рядом обстоятельств.

1. Высокие степени измельчения легче могут быть достигнуты именно в периодических машинах за счет соответствующего регулирования длительности помола. Типичный график зависимости удельной поверхности от длительности помола приведен на рис. 7.14.

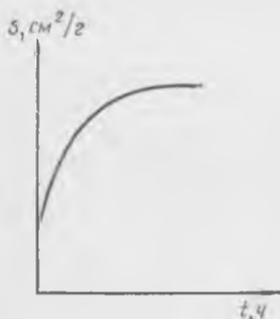


Рис. 7.14. Изменение удельной поверхности s материала от длительности t помола в мельницах периодического действия

2. В случае помола материала для огнеупорной и тонкой керамики в современных трубных мельницах трудно избежать попадания в массу металла вследствие истирания шаров, бандажей, решеток. Возможность загрязнения порошков в процессе помола металлом играет большую роль в выборе условий тонкого измельчения в керамической технологии. Величина намола мелющих тел в этом случае значительно больше, чем при крупном помоле, требования к чистоте исходного материала обычно значительно выше, а эффективность процессов магнитной очистки сильно понижена при очень малых размерах частиц.

При мокром помоле износ мелющих тел значительно выше вследствие понижения твердости и коррозии их поверхности.

Если при помоле в шаровых мельницах периодического действия задачу сохранения чистоты материала можно решить путем использования для барабана керамической футеровки и керамических мелющих тел соответствующего состава, то промышленные вибромельницы, выполняемые целиком из металла, в этом случае не могут быть использованы.

Перспективны струйные мельницы, которые в последнее время стали все больше использоваться в промышленных масштабах.

Итак, технологические требования к подбору дробильно-помольного оборудования для различных видов производства строительных материалов при обеспечении требуемой производительности по готовому продукту следующие:

- 1) аппараты для измельчения исходных материалов должны, как правило, компоноваться совместно с классификационными установками и обеспечивать получение материала требуемой крупности и заданного зернового состава;
- 2) схема компоновки этих агрегатов должна быть преимущественно «гибкой», обеспечивающая возможность варьирования как крупности исходного, так и готового продукта;
- 3) материал в процессе измельчения не должен загрязняться посторонними примесями, снижающими качество готового

продукта на последующих стадиях технологической обработки; 4) учитывая крупнотоннажность процессов измельчения в промышленности строительных материалов, стоимость как отдельных агрегатов, так и, главное, энергозатраты на процессы измельчения, необходимо иметь в виду при выборе типа измельчителя.

§ 7.3. Классификация материала в жидкой и воздушной средах

Разделение продуктов по фракциям в жидкой или воздушной средах, а также гравитационные методы обогащения сырьевых материалов основаны на различии в скоростях падения частиц разного размера и плотности в этих средах. Как известно, падение тел может быть свободным и стесненным. В классификационных аппаратах любой конструкции движение частиц в жидкости или газе происходит в стесненных условиях, которое характеризуется взаимным влиянием частиц, двигающихся в потоке жидкости или газа. При этом гидродинамические условия обтекания их иные, чем при свободном движении.

При стесненном падении встречные потоки жидкости, обтекающие частицы, движутся в промежутках между ними. Сужение потоков увеличивает градиент относительной скорости жидкости, что, в свою очередь, увеличивает касательные силы, действующие на частицы, т. е. увеличивает гидродинамическое сопротивление. При действии одной и той же активной силы (например, силы тяжести) скорость частиц при совместном падении будет меньше скорости их свободного падения. Чем больше объемная концентрация твердой фазы во взвеси, а следовательно, меньше расстояние между частицами, тем меньше скорость стесненного падения. В классификационных аппаратах стесненное падение частиц происходит в потоке жидкости, ограниченной стенками аппарата. Вследствие воздействия турбулентных вихрей, срывающихся со стенок, в аппарате происходит перемешивание частиц как в продольном, так и в поперечном направлениях. Кроме того, распределение скоростей по сечению неравномерно — меньше у стенок и выше в центре. Из-за неравномерности скоростей потока по сечению и поперечному перемешиванию скорости частиц относительно стенок аппарата различны.

Установлено, что в полидисперсных взвесах скорость падения крупных частиц уменьшается по сравнению со скоростью их падения при отсутствии мелких частиц (при одном и том же общем объеме содержания твердого компонента). Скорость падения мелких частиц при наличии в пульве крупных, наоборот, увеличивается. При осаждении крупных частиц преобладающее значение имеет динамическое сопротивление, а при осаждении мелких — сопротивление трения.

Разделение материалов в газовых средах называют воздушной сепарацией, а в жидких — гидравлической классификацией.

Воздушную сепарацию применяют для сухих порошкообразных материалов крупностью менее 1 мм, когда использование вибрационных грохотов нерационально из-за малой производительности и быстрого износа тонких сит. Крупность материала, подвергаемого гидравлической классификации, в основном, не превышает 5 мм. В промышленности строительных материалов воздушная сепарация широко применяется при помоле цемента, гипса, извести, сухой глины.

Применение в качестве несущего агента горячего воздуха или дымовых газов позволяет совместить процессы помола и сушки в одном агрегате (например, аэробильные мельницы при производстве гипса). Воздушная сепарация позволяет повысить производительность помольного агрегата на 25... 50% за счет своевременного удаления готового продукта и снизить удельные затраты энергии на 10... 20%, причем тем больше, чем выше тонкость помола.

Преимущественное распространение в промышленности строительных материалов получили проходные и циркуляционные сепараторы. В проходном сепараторе (рис. 7.15, а) воздух с исходным материалом по патрубку 1 поступает в полость между корпусами

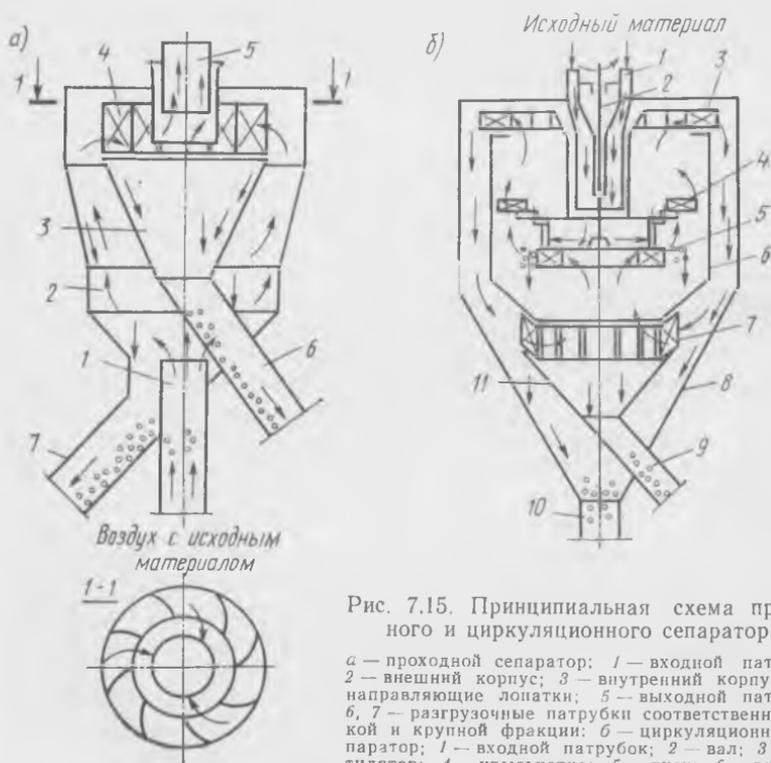


Рис. 7.15. Принципиальная схема проходного и циркуляционного сепаратора:

а — проходной сепаратор: 1 — входной патрубок; 2 — внешний корпус; 3 — внутренний корпус; 4 — направляющие лопатки; 5 — выходной патрубок; 6, 7 — разгрузочные патрубки соответственно мелкой и крупной фракции; б — циркуляционный сепаратор: 1 — входной патрубок; 2 — вал; 3 — вентилятор; 4 — крыльчатка; 5 — диск; 6 — внутренний корпус; 7 — жалюзи; 8 — внешний корпус; 9, 10 — выгрузочные патрубки соответственно крупной и мелкой фракции; 11 — воронка

2 и 3. За счет внезапного расширения канала скорость воздуха падает и крупные частицы, выпадая из взвешенного потока, через патрубок 7 отводятся на домол. Поток по направляющим лопаткам 4 поступает во внутренний конус 3, где закручивается. Регулируя угол поворота лопаток, меняют направление и скорость потока, изменяя тем самым границы разделения частиц. Мелкие частицы, выпадая из потока, отводятся по патрубку 6, а воздух со взвешенной пылью направляется по патрубку 5 в пылеосадительные устройства.

В циркуляционных сепараторах (рис. 7.15, б) пылевоздушная смесь образуется непосредственно в самом аппарате. По патрубку 1 классифицируемый материал попадает на вращающийся диск 5, расположенный на валу 2. Крупные частицы под действием силы тяжести падают вниз или же под действием центробежных сил сбрасываются на внутренний корпус 6. В обоих случаях они через воронку 11 попадают в выгрузочный патрубок 9. Вращающиеся вместе с диском 5 вентилятор 3 и крыльчатка 4 засасывают воздух из нижней зоны, который, поднимаясь вверх, подхватывает более мелкие частицы и поступает в пространство между внутренним 6 и внешним 8 корпусами, двигаясь по спирали вниз. Центробежная сила отбрасывает мелкие частицы к стенкам, где они, теряя скорость, выпадают из потока и стекают в патрубок 10. Через жалюзи 7 воздух снова поступает во внутренний корпус, где процесс повторяется. Граница разделения регулируется изменением угла установки жалюзи и радиуса расположения лопастей крыльчатки.

Циркуляционные сепараторы по сравнению с проходными более компактны и экономичны, так как в одном аппарате объединены вентилятор и осадительные устройства.

Гидравлическую классификацию в промышленности строительных материалов применяют главным образом для фракционирования песка, разделения гравийно-песчаной смеси, промывки заполнителей от илесто-глинистых частиц. По принципу действия различают горизонтальные и вертикальные гидравлические классификаторы, центробежные и механические (речные, спиральные, драговые) классификаторы.

В качестве примера на рис. 7.16 показана принципиальная схема вертикального гидрокласификатора с восходящим потоком жидкости. Исходная гидросмесь по подводящему трубопроводу 1 попадает в диффузор 3, где скорость потока резко снижается и из нее выпадают наиболее крупные частицы, которые, оседая, удаляются через разгрузочное отверстие 5. Мелкие фракции подхватываются потоком чистой воды, подаваемой по трубопроводу 6 в классификационную камеру 4, и удаляются с пульпой через сливное отверстие 2. При необходимости разделения исходного про-

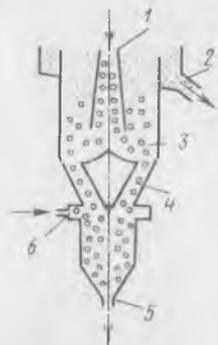


Рис. 7.16. Принципиальная схема вертикального классификатора

дукта на несколько фракций в технологическую схему последовательно включают несколько гидрокласификаторов. Один классификатор предназначен для фракционирования гидropесчаной смеси по одному граничному зерну в пределах 0,3...3,0 мм. Для получения стабильного зернового состава гидрокласификаторы необходимо обеспечить постоянным питанием как по зерновому составу, так и по концентрации твердой фазы в последующей гидросмеси. Надежность в работе и простота конструкции обеспечили широкое применение этих аппаратов для обогащения песка.

Более высокая точность разделения песка на несколько фракций достигается в горизонтальных гидравлических классификаторах стесненного падения с восходящим потоком воды. На рис. 7.17, а показана принципиальная схема многокамерного классифи-

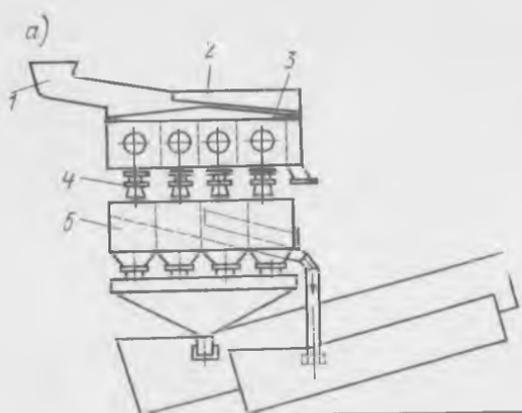


Рис. 7.17. Общий вид (а) и классификационная камера (б) горизонтального гидравлического классификатора

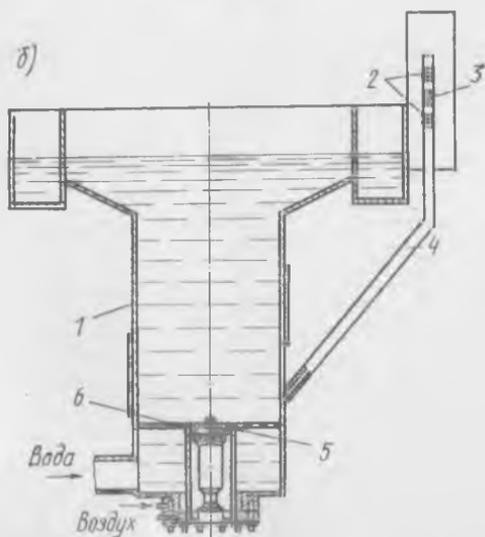
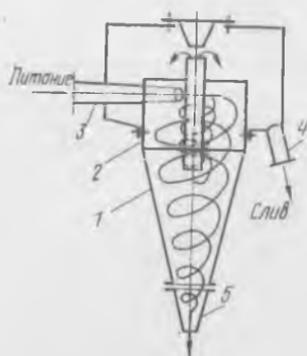


Рис. 7.18. Схема гидроциклона



катора такого типа конструкции ВНИИстройдормаша. Гидровзвесь около 50%-ной концентрации (по массе) поступает в приемное устройство 1 и движется вдоль верхнего желоба 2 к разгрузочному концу. По мере продвижения пульпы из нее в специальные камеры 3 выпадают твердые частицы: в первые камеры — более крупные, а затем — мелкие в приемные емкости 5. Готовый продукт выгружается через разгрузочное устройство 4. Для лучшего разделения в каждую камеру 1 (рис. 7.17, б) снизу через перфорированную решетку 6 подается вода, количеством которой регулируется скорость восходящего потока, а следовательно, и размер взмучиваемых частиц. Количество подаваемой воды уменьшается от начальных камер к последующим. Выгрузка песка из камер производится автоматически при заданной плотности пульпы. Для ее измерения в каждой камере установлена гидростатическая трубка 4 с датчиками 2 и поплавком 3. При увеличении плотности пульпы уровень воды в трубке повышается, поплавок замыкает контакт верхнего датчика и реле подает сигнал к открытию разгрузочного отверстия 5. По мере разгрузки плотность пульпы снижается, поплавок через нижний датчик дает сигнал на закрытие выгрузочного отверстия.

Продолжительность цикла работы камеры и плотность разгружаемой пульпы регулируются расположением датчиков по высоте трубки. Производительность классификаторов этого типа определяется производительностью отдельных его камер и возрастает с увеличением границ разделения.

Из центробежных классификаторов в промышленности строительных материалов наибольшее распространение получили гидrocиклоны (рис. 7.18). Исходная гидровзвесь при избыточном давлении 0,1 ... 0,2 МПа тангенциально подается через питающий патрубок 3 в цилиндрическую часть 2 корпуса аппарата. За счет вращательного движения пульпы возникают центробежные силы, в несколько раз превышающие гравитационные силы отдельных частиц. Фракционный состав твердой фазы в нисходящем потоке неодинаков — более крупные частицы располагаются по большему радиусам вращения ближе к наружным стенкам. В конусной части 1 корпуса аппарата поток разделяется на две части за счет различных по величине центробежных сил инерции: крупные частицы выпадают из потока и выгружаются через отверстие 5, мелкие подхватываются восходящим вихревым потоком в центре аппарата и выводятся из него через сливной патрубок 4.

Механические классификаторы в промышленности строительных материалов применяют главным образом для выделения в песках фракции менее 0,15 мм и для обезвоживания песков до транспортабельного состояния. Принципиально их конструкции отличаются подвижным механизмом разгрузки — спирали, гребковые рейки, скребки на бесконечной ленте или цепи. Принцип действия основан на различной скорости падения частиц в горизонтальном потоке пульпы. На рис. 7.19 показан спиральный классификатор, представляющий собой наклонное корыто 1, внутри

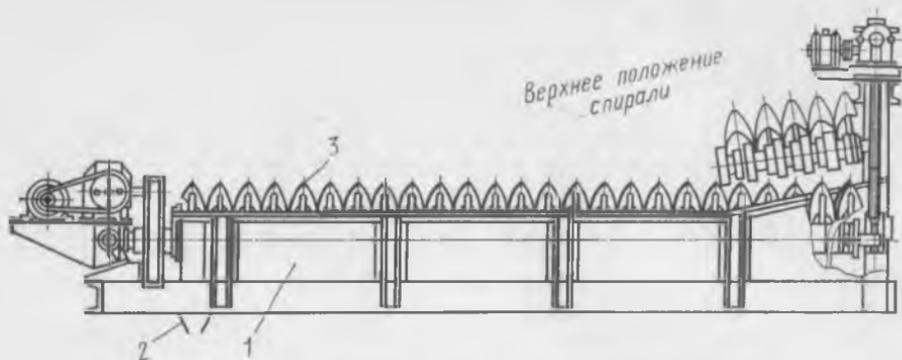


Рис. 7.19. Спиральный классификатор для песка

которого расположено спиральное устройство 3. Вращением спирали пульпа взмучивается, крупные частицы перемещаются вверх к разгрузочному окну 2, а слив, содержащий мелкие частицы, отводится в нижней части короба через сливной порог. Увеличением угла наклона корыта регулируют граничную крупность разделения материала.

§ 7.4. Перемешивание компонентов и общие закономерности гомогенизации масс

Практически любой строительный материал состоит как минимум из двух, а большей частью из нескольких компонентов. Качество смеси, из которой формируется изделие, во многом определяется качеством перемешивания. В практике производства строительных материалов широко применяется перемешивание сухих компонентов, приготовление полусухих, пластичных и литых масс.

Способы перемешивания и выбор аппаратуры для его проведения определяются целью перемешивания и агрегатным состоянием перемешиваемых материалов. Смешивание масс — процесс, зависящий от многих параметров и факторов.

Основной задачей этого технологического передела в производстве строительных материалов является получение однородной смеси компонентов, т. е. гомогенизация составляющих смеси. Скорость и результат смешения во многом определяются формой и величиной частиц, общим зерновым составом и каждого компонента в отдельности, числом смешиваемых компонентов и соотношением их количеств, плотностями смешиваемых компонентов и их коэффициентами трения, степенью увлажнения и способностью к слипанию отдельных частиц, степенью измельчения зернового состава в процессе перемешивания. Перемешивание осуществляется в специальных аппаратах — смесителях, конструкция которых зависит от характера смеси и требуемой производительности.

В зависимости от физического состояния перемешиваемых веществ различают: 1) машины для перемешивания жидких смесей (шлама, красителей и т. п.) — шламовые, пропеллерные, турбинные, планетарные, грабельные и др.; 2) машины для приготовления грубодисперсных суспензий (бетонных смесей, строительных растворов, керамических масс и т. п.); 3) машины для перемешивания сухих порошковых и зернистых материалов зачастую с последующим увлажнением — лопастные, бегунковые, планетарные и другие смесители механического типа принудительного действия (рис. 7.20).

Наиболее важной характеристикой перемешивающих устройств, являющихся основой для их сравнительной оценки, является эф-

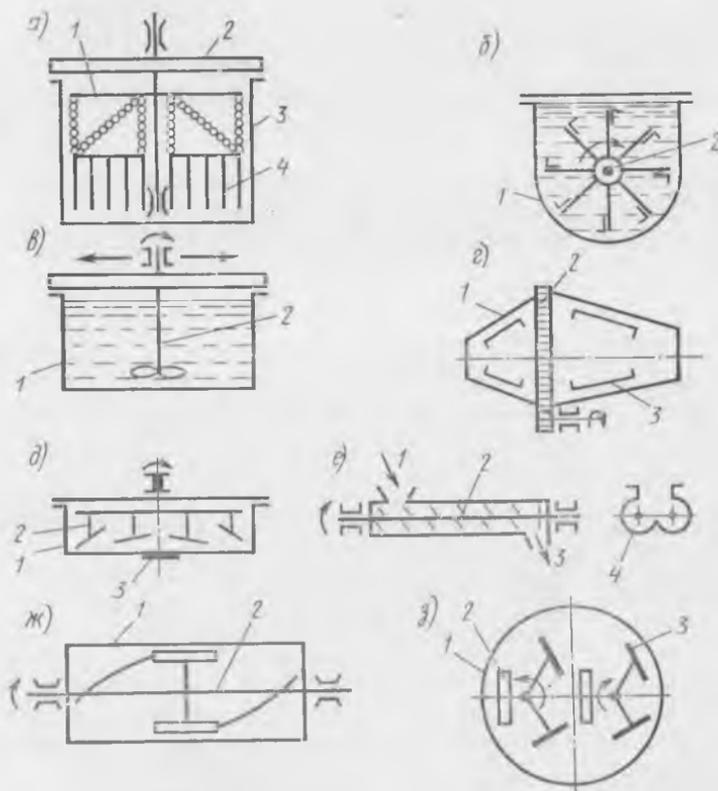


Рис. 7.20. Принципиальные схемы основных типов смесителей:

а — глиноболтушка; 1 — траверса; 2 — рама; 3 — резервуар; 4 — борны на цепной подвеске; *б* — горизонтальный лопастный смеситель для роспуска глины; 1 — корпус; 2 — вал с лопастями; *в* — пропеллерный смеситель; 1 — резервуар; 2 — вал с пропеллером; *г* — гравитационный бетоносмеситель периодического действия; 1 — барабан; 2 — венцовая шестерня; 3 — лопасти; *д* — бетоносмеситель принудительного действия; 1 — чаша; 2 — лопасти; 3 — выгрузочное отверстие; *е* — горизонтальный двухвалый смеситель непрерывного действия; 1, 3 — загрузочная и выгрузочная воронки; 2 — вал с винтовыми разрезными лопастями; 4 — корыто; *ж* — растворосмеситель; 1 — корпус; 2 — вал с лопастями; *з* — бегуны; 1 — чаша; 2 — катки; 3 — лопасти

фективность аппарата и интенсивность его действия. Эффективность перемешивающего устройства характеризует качество проведения процесса перемешивания и в промышленности строительных материалов определяется степенью гомогенизации массы, т. е. степенью равномерности распределения компонентов в объеме полученной смеси. Интенсивность перемешивания определяется временем достижения заданного технологического результата.

Так как основным назначением операции смешения является максимальная однородность состава, то в случае двухкомпонентной смеси это требование идентично максимальному увеличению первоначальной поверхности раздела между компонентами смеси. Для осуществления этого требуется некоторое минимальное время.

Если рассматривать процесс смешения как взаимную диффузию частиц, то согласно первому закону Фика скорость диффузии определяется уравнением (6.31). Вводя коэффициент k , зависящий от коэффициента диффузии, толщины диффузионного слоя и поверхности соприкосновения компонентов, можно написать

$$dm/dt = k(C_r - C_f). \quad (7.12)$$

В процессах смешения изменяющиеся во времени концентрации материала (C_r и C_f) и количество перемешанного компонента можно заменить изменяющейся величиной поверхности раздела, тогда

$$dA/dt = k(A_{\max} - A_t), \quad (7.13)$$

где A_{\max} — максимально возможная поверхность раздела, достигаемая при $t \rightarrow \infty$; A_t — поверхность раздела в данный момент смешения. После интегрирования получим уравнение кинетики смешения

$$A_t = A_{\max}(1 - e^{-tk}). \quad (7.14)$$

Так как A_{\max} не может быть определено экспериментально, то по данному уравнению нельзя определить A_t .

Из теории вероятности можно записать

$$P_t = 1 - e^{-kA_{\max}(1 - e^{-tc})}, \quad (7.15)$$

где P_t — вероятность того, что, по крайней мере, один из элементов новой поверхности раздела попадет в элементарный объем ΔV смеси при данном времени перемешивания t ; k — коэффициент пропорциональности.

Преобразуя выражение (7.15), можно получить

$$kA_{\max} = \ln \frac{1}{1 - P_t} / (1 - e^{-tc}). \quad (7.16)$$

Далее, для определения времени перемешивания в данном конкретном аппарате проводят два эксперимента, устанавливая значения kA_{\max} для каждого опыта. При этом вместо t принимают число оборотов смесителя, а вместо P_t — долю проб, содержащих

заданное количество компонента с отклонениями $\pm 5\%$ (вероятность 95% в технике считается достоверностью).

Оценкой качественной стороны перемешивания служит степень гомогенизации массы. Для этого из общей массы отбирают пробы. В двухкомпонентной смеси $M+N$ сумма масс отдельных компонентов равна массе отобранной пробы. Общее количество смеси равно сумме всех подобных долей по массе, т. е.

$$\sum_{i=1}^{i=N} g_i = G.$$

Концентрация компонентов в любой пробе будет M_i и N_i , тогда

$$M_i = g M_i / g_i \text{ и } N_i = g N_i / g_i. \quad (7.17)$$

В идеально перемешанной смеси должно быть соблюдено равенство

$$\sum_{i=1}^{i=n} M_i + \sum_{i=1}^{i=n} N_i = M + N = 1. \quad (7.18)$$

Отклонение частот по массе компонентов M_i и N_i :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (M_i - M)^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=N} (N_i - N)^2}. \quad (7.19)$$

Для количественной оценки качества перемешивания пользуются коэффициентом изменчивости (коэффициент вариации, %)

$$\bar{C}_v = \frac{\sigma}{N} 100. \quad (7.20)$$

Очевидно, что при идеальном смешении $\bar{C}_v = 0$. На практике считают качество смешения удовлетворительным при $\bar{C}_v = 6..8\%$, хорошим — при $\bar{C}_v = 4..6\%$, а очень хорошим — при $\bar{C}_v < 4\%$.

Анализ общего уравнения кинетики смешения и ряд экспериментальных данных позволяет сделать некоторые качественные выводы: 1) излишнее время перемешивания не приводит к улучшению качества перемешивания. В некоторых случаях оно вредно, поскольку может происходить доизмельчение составляющих или протекать нежелательные реакции между составляющими; 2) при смешении большого количества одного компонента с малым количеством другого вероятность равномерного распределения компонентов в объеме смеси уменьшается. В этом случае рациональнее проводить многоступенчатое перемешивание; 3) степень смешения уменьшается при увеличении разности диаметров смешиваемых компонентов.

Как уже указывалось, практические количественные выводы из общего уравнения кинетики перемешивания не всегда возможны. В настоящее время такие характеристики получены лишь для механического перемешивания жидких сред.

Процесс перемешивания механическими мешалками жидкостей сводится к внешней задаче гидродинамики — обтеканию тел потоком жидкостей. Как следует из обобщенного уравнения гидродинамики, установившееся вынужденное движение жидкости описывается критериальным уравнением (4.54) $Eu = f(Re, Fr, \Gamma)$.

Если вместо линейной скорости жидкости, входящей в критерии Эйлера, Рейнольдса, Фруда, подставить величину nd , пропорциональную окружной скорости $\omega_{\text{кр}} = \pi nd$, где n — число оборотов смесителя, d — диаметр ее, то получим так называемые модифицированные критерии:

$$Re_m = ndd\rho/\eta = nd^2\rho/\eta; \quad (7.21)$$

$$Fr_m = n^2d^2/(gd) = n^2d/g; \quad (7.22)$$

$$Eu_m = \Delta p/(\rho n^2 d^2). \quad (7.23)$$

В критерии Эйлера Δp характеризует разность давлений перед и после лопасти смесителя. Этот перепад давлений преодолевается силой P , приложенной к валу смесителя. Величина полезной мощности N , которую сообщают жидкости, пропорциональна произведению усилия на валу P и окружной скорости, т. е. $N \sim Pnd$.

Учитывая, что площадь, на которую распределено усилие P , определяется квадратом диаметра, можно записать: $\Delta p \sim P/d^2 \sim \sim N/(nd^3)$.

Подставив полученное выражение в значение Eu_m , получим критерий мощности

$$K_N = N/(\rho n^3 d^5). \quad (7.24)$$

Тогда для процесса перемешивания обобщенное уравнение гидродинамики примет такой вид:

$$K_N = f(Re_m; Fr_m, \Gamma) \quad (7.25)$$

или

$$K_N = A Re_m^m Fr_m^N \Gamma^q. \quad (7.26)$$

Значения коэффициента A и показатели степеней определяют опытным путем. Они зависят от типа смесителя, конструкции его и режима перемешивания.

В справочной литературе имеются графики зависимости $K_N = \varphi(Re_m)$ для геометрически подобных смесителей, в которых силой тяжести можно пренебречь.

При механическом перемешивании жидкостей различают ламинарный режим ($Re_m < 30$), турбулентный ($30 < Re_m < 10^5$) и автомодельную область развитой турбулентности ($Re_m > 10^5$), в которой K_N практически не зависит от Re_m и расход мощности определяется инерционными силами. Дальнейшее увеличение числа оборотов хотя и приводит к увеличению интенсивности перемешивания, но экономически нецелесообразно, поскольку возрастание затрат мощности не компенсируется достигаемым эффектом.

Следует иметь в виду, что мощность, определенная этим методом, является рабочей. При определении мощности электродвигателя смесителя необходимо учитывать пусковой момент. В момент пуска мощность на валу смесителя составляет сумму рабочей и пусковой мощностей, т. е.

$$N_{\text{общ}} = N + N_{\text{пуск}} \quad (7.27)$$

Во время пускового периода энергия расходуется на преодоление инерции подвижных частей самого смесителя и перемешиваемой жидкости. В некоторых случаях величина $N_{\text{пуск}}$ может составлять половину $N_{\text{общ}}$.

Можно показать, что только на преодоление инерции жидкости расходуется мощность

$$N = 1,9hd^4n^3\rho, \quad (7.28)$$

где h — высота лопасти смесителя; d — диаметр смесителя; n — частота вращения лопасти; ρ — плотность перемешиваемой жидкости.

§ 7.5. Классификация методов и общие закономерности формования изделий

В технологическом процессе получения строительных изделий операции по формованию являются одним из основных переделов. В большинстве случаев применение того или иного способа формования определяется свойствами формуемых масс и видом изделия.

Важнейшим фактором в выборе способа формования является получение полуфабриката с заданными свойствами. Именно свойства полуфабриката и определяют как дальнейшие режимы его переработки — сушку, обжиг, тепловлажностную обработку, так и физико-технические свойства готовых изделий — плотность, равномерность распределения частиц по объему, отсутствие дефектов в строении сырца (раковины, трещины и т. п.) и, наконец, механическую прочность.

Прочностные характеристики сырца непосредственно не влияют на его поведение при дальнейшей обработке и на прочность готовой продукции. Однако они являются определяющими в выборе способа транспортировки полуфабриката, способа садки изделий на сушильные вагонетки и в пропарочные камеры, в назначении режимов последующей тепловой обработки. Кроме того, при формовании полуфабриката могут возникнуть значительные внутренние напряжения, которые при дальнейших технологических переделах могут вызвать появление дефектов в готовом изделии. Правильно выбранный метод формования полуфабриката является залогом хорошего качества готового продукта.

Основное назначение процесса формования — получить полуфабрикат заданной формы. Но это не единственная задача. Назначение этого процесса еще и в том, чтобы получить полуфабри-

кат заданной плотности без дефектов внутренней структуры. Для большинства строительных изделий сырец должен иметь минимально возможную, равномерно распределенную по всему объему пористость.

Для теплоизоляционных изделий пористость сырца должна быть максимальна при равномерном распределении ее в объеме изделия. Но даже и в этом случае плотность связующего, занимающего межпоровое пространство, должна быть по возможности максимальна, поскольку она является носителем прочности материала. Таким образом, применяемый в технике термин «формуемость смеси» подразумевает, во-первых, способность ее принимать требуемую форму и, во-вторых, уплотняться под действием внешних сил. Употребляемое при этом понятие «пластичности» и «консистенции» в полной мере могут характеризовать формовочные свойства (формуемость) массы.

Под *пластичностью* обычно понимают способность массы переносить значительные необратимые деформации без нарушения сплошности.

М. П. Воларович, основываясь на уравнении Шведова — Бингама (4.107), предложил характеризовать пластичность показателем пластичности

$$\varphi = P_{пл} / \eta_{пл}, \quad (7.29)$$

где $P_{пл}$ — предел прочности системы при сдвиге, соответствующий τ_{max} (см. рис. 4.23, кривая 3); $\eta_{пл}$ — пластическая вязкость.

И. Н. Ахвердов предлагает мерой пластичности считать модуль сдвига и коэффициент внутреннего трения f , определяемый из уравнения Кулона для связанных грунтов

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi + C, \quad (7.30)$$

где τ — напряжение сдвига системы; σ — нормальные напряжения в системе; φ — угол внутреннего трения; C — сцепление грунта.

Для рассматриваемых масс с определенной степенью приближения $\operatorname{tg} \varphi$ интерпретируется как коэффициент внутреннего трения f , а сцепление C — как предельное напряжение сдвига системы. Тогда уравнение (7.30) записывается в виде

$$\tau = \tau_0 + \sigma f. \quad (7.31)$$

Консистенция — это состояние системы, определяемое совокупностью всех сил внутреннего сцепления — адсорбционных, капиллярных, сил трения. Изменения взаиморасположения и формы частиц твердой фазы, количественных соотношений газообразной (воздуха), жидкой и твердой фаз приводят к изменению консистенции массы. Консистенция однозначно определяется предельным напряжением сдвига системы.

В технологии строительных материалов принято течение пластических смесей с небольшой концентрацией крупного заполнителя описывать уравнением Шведова — Бингама, а для описания течения жестких смесей с большим содержанием крупного запол-

нителя, малым количеством воды и связки часто применяют уравнение Кулона. При этом считают, что в связи с отсутствием сплошной среды из цементного теста или растворной составляющей (для бстонов, например) значительно возрастает сопротивление сдвигу, так как наряду с повышенным вязким трением в среде из-за относительно малого содержания воды возникает дополнительное сухое трение между контактирующими друг с другом зернами заполнителя.

Такое представление не лишено некоторой идеализации. Во-первых, уравнением Шведова — Бингама могут быть описаны только минеральные массы. Большинство растворов полимеров, а также полимерных композиционных материалов описываются уравнением Оствальда (4.109) и не подчиняются закону Шведова — Бингама. Поэтому введение в минеральные композиции полимерных добавок (например, поливинилацетатной дисперсии или дисперсии полиэтилена в бетоны) изменяет и характер течения всей массы. Во-вторых, говорить о наличии чистого сухого трения даже в жестких бетонных смесях, строго говоря, не совсем корректно, так как даже при малом количестве воды затворения ее в реальных смесях все-таки достаточно для смачивания крупного заполнителя и образования поверхностной пленки. Адсорбционные силы значительно превышают реальные сдвиговые усилия, и возможность сухого трения практически исключается. В-третьих, наличие значительного количества газообразной фазы в поризованных минеральных смесях (например, ячеистого бетона или керамики) накладывает свой отпечаток на кривые течения и деформаций и тем больше, чем больше газовой фазы содержится в этих массах.

Таким образом, для чисто минеральных масс уравнения Шведова — Бингама и Кулона являются предельными случаями, в которых приближается характер течения реальных масс в зависимости от того, какой является смесь — пластической или жесткой.

В свете изложенного определенный интерес представляет формула, предложенная С. С. Вяловым для глинистых грунтов:

$$\tau = \tau_0 + \eta_{пл}(dv/dy) + \sigma f, \quad (7.32)$$

При $dv/dy = 0$ это выражение превращается в уравнение Кулона, а при $f = 0$ — в уравнение Шведова — Бингама. Выражение (7.32) для минеральных масс, используемых в промышленности строительных материалов, требует уточнения. Что касается полимерных композиций, то, как показали исследования, их течение тем больше отклоняется от закона Оствальда, чем больше поризована масса и чем большее количество наполнителя содержится в смеси.

Для объяснения природы связанности и прочности дисперсных масс выдвинуты несколько гипотез. До недавнего времени основной считалась капиллярная теория, согласно которой пластично-вязкие характеристики дисперсных систем объяснялись главным образом силами натяжения воды в капиллярах на границе раздела жидкой и газообразной фаз. Развивающееся при этом капил-

лярное давление стремится сблизить твердые частицы между собой.

Наиболее полно связанность дисперсных систем можно объяснить исходя из современных представлений молекулярно-кинетической теории. Силы, действующие между отдельными дисперсными частицами, те же, что и силы притяжения и отталкивания между молекулами, ионами и атомами (см. § 3.3). Так же как и на уровне молекулы, иона или атома, силы взаимодействия между частицами могут вызывать как взаимное притяжение этих частиц, так и их отталкивание. Силами притяжения являются молекулярные, Ван-дер-Ваальсовы силы, если расстояние между молекулами более $1 \dots 2 \text{ \AA}$, ионно-электростатические и кулоновы, если частицы контактируют разнозначно заряженными поверхностями, а также водородные связи. Силами отталкивания являются кулоновы силы при контакте однозначно заряженных поверхностей частиц, близкодествующие молекулярные силы, а также силы расклинивания. Последние обусловлены наличием гидратных оболочек, окружающих минеральные частицы.

Взаимодействие между твердой и жидкой фазами в формовочной массе имеет электрическую природу. Внутри твердой частицы ионы с различными знаками уравновешены. На поверхности же частицы такое равновесие не достигается, вследствие чего частица ведет себя как электрически заряженное тело. Под действием электрического поля диполи воды вокруг частицы принимают ориентированное положение и притягиваются к поверхности частицы. Вблизи поверхности, где силы притяжения весьма велики, молекулы воды прочно связаны с поверхностью частицы, образуя молекулярный ориентированный слой, не участвующий в движении жидкости. Этот слой прочносвязанной (адсорбированной) воды представляет собой граничную фазу и рассматривается как единое целое с минеральной частицей. Толщина граничной фазы соответствует толщине одной или нескольких молекул. Более удаленные ориентированные молекулы рыхлосвязанной (лисорбированной) воды образуют диффузионный слой, который участвует в движении жидкости, обтекая при деформировании твердую частицу. Адсорбированная и лисорбированная вода (лиосфера) образуют двойной слой, толщина которого составляет несколько сотен ангстрем и за пределами которого находится свободная вода. Таким образом, твердая частица с лиосферой представляет собой сложное новообразование, в котором высокодисперсная твердая фаза (ядро) связана с окружающей средой через стабилизирующий двойной электрический слой ионов. Такой структурно-неоднородный комплекс разнородных веществ называют мицеллой; она способна к самостоятельному существованию и определяет все основные свойства коллоидной и дисперсной систем (рис. 7.21).

Если контактирование частиц происходит так, что расстояние между их поверхностями в месте контакта не превышает размера слоя прочносвязанной воды, то возникает расклинивающее дейст-

вне водной пленки с силой $F=A/r^3$, где A — постоянная Ван-дер-Ваальса ($A=10^{-9}$ Дж), а r — расстояние между частицами. Этот эффект был установлен Б. В. Дерягиным. Если частицы контактируют через диффузионные слои, то расклинивающее действие водных пленок обусловлено, с одной стороны, электростатическими силами отталкивания, а с другой — осмотическими. Теория осмотического давления рассматривает условия равновесия двух твердых частиц, разделенных слоем жидкости.

По Б. В. Дерягину, понятие о расклинивающем действии слоя воды исходит из рассмотрения условия равновесия жидкости, находящейся между твердыми частицами. Оба эти подхода дают идентичные результаты.

В зависимости от физико-химических условий формирования формовочных масс П. А. Ребиндер предложил образующиеся структуры подразделять на два основных типа: коагуляционно-тиксотропные и конденсационно-кристаллизационные.

Коагуляционно-тиксотропные структуры характеризуются водно-коллоидными связями молекулярно-ионно-электростатической природы, рассмотренными выше. Так как толщина водных пленок, а соответственно и величина сил притяжения, при прочих равных условиях зависит от плотности формовочной массы, то сцепление между отдельными частицами возрастает при уплотнении массы. Сами связи малопрочны, легко подвижны и после разрыва восстанавливаются, т. е. способны к тиксотропному упрочнению. Кинетика тиксотропного восстановления прочности разрушенной структуры обусловлена беспорядочными соударениями коллоидных частиц, находящихся в интенсивном броуновском движении. Не все такие соударения приводят к повторному слипанию частиц. В результате эффективных соударений, происходящих на наиболее активных участках — ребрах, углах, где силы притяжения имеют наибольшее значение, частицы вновь сцепляются друг с другом и с более крупными зернами. Условиями, определяющими тиксотропное восстановление коагуляционной структуры, являются относительно низкая прочность первоначальной структуры, наличие коллоидно-дисперсной фракции частичек, интенсивно участвующих в тепловом движении. Типичными представителями таких структур являются глина-

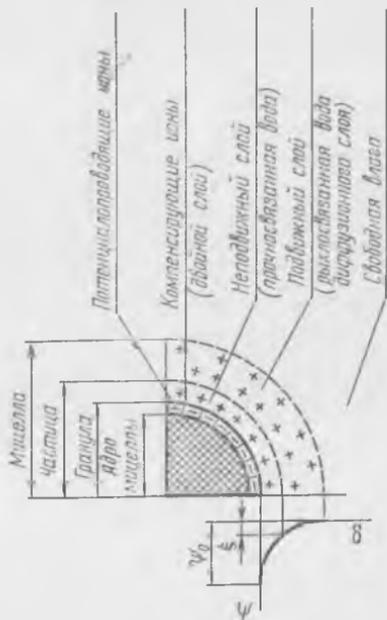


Рис. 7.21. Строение мицеллы:

Φ — термодинамический потенциал, определяющий суммарные силы связи слоев мицеллы; ψ — электрокинетический потенциал, характеризующий связи диффузного слоя воды; δ — толщина слоев

ные массы, а также цементное (известковое, гипсовое) тесто в первоначальный период после затворения вяжущего водой.

В *конденсационно-кристаллизационных структурах* частицы соединены непосредственно, без разделения их водной пленкой. Так, в массах, содержащих минеральные вяжущие вещества, коагуляционная структура сохраняется непродолжительное время и в период твердения в ней возникают элементы кристаллизационной структуры. Связанность такой системы в значительной степени определяется кристаллизационными все возрастающими связями.

Коагуляционно-кристаллизационные структуры не обладают тиксотропными свойствами и при разрушении не восстанавливаются. Вот почему для таких структур процесс формирования должен заканчиваться до момента образования кристаллизационных связей.

Поскольку процесс формирования изделий всегда связан с уплотнением первоначальной смеси, т. е. с уменьшением расстояния между отдельными частицами, тиксотропному восстановлению структуры всегда сопутствует и ее упрочнение.

Строительные изделия изготовляют методом вибрирования, центрифугирования, прессования (сухое, полусухое), пластического формирования и литья, а также вакуумирования.

Виброформование. Вибрирование является основным методом формирования бетонных и железобетонных изделий. Кроме того, научно-исследовательские разработки и опытно-производственное опробование показывают, что метод виброформования достаточно перспективен и в производстве различного рода керамических изделий.

Большинство формовочных масс в промышленности строительных материалов состоит из связующего (как правило, высокодисперсных частиц в смеси с водой) и более или менее крупных частиц заполнителя. Для компактной упаковки последних при отсутствии связующего достаточно интенсивное встряхивание при амплитуде, способной вызвать перемещение зерен. Чем больше размер зерен, тем больше должна быть амплитуда колебаний, сообщаемых вибратором. В формовочных массах такому перемещению заполнителя препятствуют вязкопластические свойства связующего. Для того чтобы зерна заполнителя получили возможность более компактно взаиморасположиться в пространстве, необходимо нарушить структурные связи в связующем с последующим их восстановлением после прекращения возмущающих воздействий.

Таким образом, сущность метода виброформования заключается в эффекте тиксотропного разжижения формируемой массы. При этом энергия внешнего воздействия будет расходоваться на нарушение структурных связей связующего, пространственную перегруппировку зерен заполнителя, придание массе заданной формы, коагуляционное уплотнение связующего, сопровождающееся уплотнением всего объема смеси за счет собственной массы и внутреннего воздействия сил, вызывающих тиксотропное упрочнение системы.

Эффективность виброуплотнения зависит как от параметров вибрации, так и от реологических характеристик смеси. Параметры вибрирования характеризуются амплитудой колебаний A , частотой колебаний f и продолжительностью вибрирования t . Многочисленными исследованиями установлено, что отдельно взятые параметры вибрирования не могут характеризовать эффекта уплотнения. Качество уплотнения определяется совокупностью этих параметров, критериями которых являются скорость колебаний $A\omega$, ускорение колебаний $A\omega^2$ или интенсивность колебаний $A^2\omega^2$ (где ω — угловая скорость).

Параметры вибрации должны быть выбраны такими, чтобы энергия вибрации превысила значения предельного напряжения сдвига данной системы. При превышении значений предельного напряжения сдвига уплотняемая смесь превращается в подвижную текучую массу. Подчиняясь законам гидростатики, она приобретает способность заполнять форму даже со сложным очертанием и уплотняться под действием сил тяжести, вытесняя имеющиеся пузырьки воздуха наружу. Под влиянием сообщенных вибрацией импульсов частицы смеси находятся в непрерывном колебательном движении около некоторых осредненных положений неустойчивого равновесия. В результате смещения соседних частиц образуется пустота, которая и заполняется вышележащей частицей под действием силы тяжести.

Чем выше предельное напряжение сдвига и вязкость смеси, тем больше должна быть интенсивность вибрирования. Увеличение интенсивности вибрирования выше определенного предела нежелательно, так как это может привести к расслаиванию смеси.

Необходима интенсивность вибрирования может быть достигнута при различных сочетаниях значений амплитуды и частоты колебаний. Оптимальные значения амплитуды колебаний тем выше, чем крупнее зерновой состав смеси. Чем больше значение реологических характеристик смеси, тем выше должна быть частота колебаний; увеличение амплитуды колебаний в этом случае менее эффективно.

Увеличение амплитуды выше определенных пределов может вызвать подсос воздуха у стенок формы и, как следствие, разуплотнение смеси. Недостаточная амплитуда увеличивает необходимое время вибрации и снижает производительность формирующих машин.

Тиксотропия связующего может быть вызвана высокочастотными вибрационными колебаниями любой направленности. Однако для плотной упаковки заполнителя и предотвращения разрыхления смеси в процессе вибрирования возникающие инерционные силы должны совпадать с направлением силы тяжести.

Обычно формовочная смесь состоит из частиц, разнородных по размерам и плотности, поэтому для ее уплотнения желательно применять поличастотное вибрирование. При этом, поскольку вибрация низкой частоты эффективна для крупных зерен (типа щебня), средней частоты для зерен песка и высокой частоты для тон-

ких зерен связующего, использование поличастотного вибрирования должно увеличить однородность уплотнения.

В промышленности строительных материалов помимо простого вибрирования применяют различные варианты виброуплотнения — вибрирование с пригрузом, виброштампование, вибротрамбование, совмещение вибрирования с вакуумированием массы. Все эти методы направлены на получение изделий максимальной плотности.

Основным агрегатом, используемым для виброформования изделий, является виброплощадка. Часто при формовании жестких и особо жестких смесей в дополнение к виброплощадке используют вибропригруз, а при наличии пустот в изделиях — вибровкладыши соответствующей конфигурации.

В промышленности сборного железобетона применяют виброплощадки с круговыми, горизонтально или вертикально направленными колебаниями (рис. 7.22). Для хорошей работы вибропло-

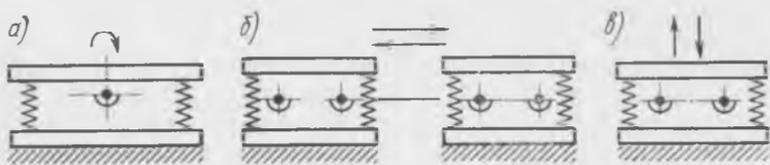


Рис. 7.22. Схемы виброплощадок:

а — с круговыми колебаниями; б — горизонтально направленными колебаниями; в — вертикально направленными колебаниями

щадок с круговыми колебаниями необходимо обеспечить соосность дебалансного вала виброплощадки и центра тяжести формы с уплотняемой массой. В противном случае траектории круговых колебаний смеси превращаются в эллипсоидные с неодинаковой амплитудой в различных точках изделия, что приводит к разнотности изделия. Подобные дефекты наблюдаются и в изделиях, имеющих большую толщину и ширину из-за смещения бетонной смеси в сторону направления вращения дебалансного вала. Кроме того, при формовании широких изделий на виброплощадках этого типа отмечается повышенное засасывание воздуха у стенок формы.

Виброплощадки с вертикально направленными колебаниями отличаются равномерным распределением амплитуд колебаний и, следовательно, равномерным уплотнением смеси при изготовлении широких изделий относительно небольшой высоты. К недостаткам их следует отнести более сложную по сравнению с предыдущим типом конструкцию, а также сильные шумы при работе, зачастую превышающие допустимые нормы.

На виброплощадках с горизонтальными колебаниями смесь получает колебания от поддона и боковых стенок формы в касательном направлении. Они хорошо зарекомендовали себя при формовании длинномерных изделий.

Для вибрирования используют также поверхностные (например, при формировании железобетонных изделий в кассетах) и глубинные вибраторы. Для формирования коротких труб больших диаметров нередко применяют вибросердечник — разновидность поверхностного вибратора.

Центрифугирование. Под центрифугированием (труб, опор для линий электропередач и т. д.) в промышленности строительных материалов понимают процесс уплотнения неоднородных смесей в поле центробежных сил.

Центробежная сила инерции, действующая на частицу смеси:

$$F_{ц} = m\omega^2 r = \frac{G}{g} \left(\frac{\pi n}{30} \right)^2 r, \quad (7.33)$$

где m — ее масса; ω — угловая скорость вращения; r — радиус вращения центра тяжести частицы; G — вес частицы; g — ускорение силы тяжести; n — число оборотов.

Существует понятие о критической окружной скорости, начиная с которой частицы под действием силы тяжести не будут отрываться от внутренней поверхности формы в верхнем положении (рис. 7.23, I). Для этого должно быть соблюдено условие $F_{ц} \geq G$, тогда

$$n_{кр} \geq \frac{30}{\pi} \sqrt{g/r}. \quad (7.34)$$

Уплотнение смеси следует проводить при такой скорости вращения, которая обеспечивает необходимую начальную прочность изделия, достаточную для распалубки его и дальнейшей транспортировки.

Обычно начальная прочность свежееотформованной трубы характеризуется величиной уплотняющей силы на наружной поверхности

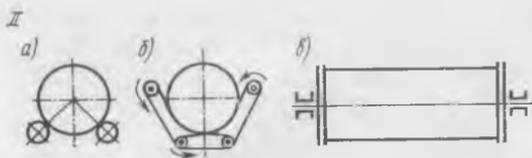
$$F_{нар} = \frac{F_{ц}}{A_{нар}} = \frac{2\pi\rho\omega^2}{3g} \frac{R^3 - r^3}{2\pi r} = \frac{\rho\omega^2}{3g} \frac{R^3 - r^3}{R}, \quad (7.35)$$

где $F_{ц}$ — центробежная сила; $A_{нар}$ — наружная поверхность тру-



Рис. 7.23. Расчетная I и принципиальные II схемы центрифуг:

a — роликовой; б — ременной; в — осевой



бы; ρ — плотность смеси (усредненная); ω — угловая скорость; g — ускорение свободного падения; R — наружный радиус изделия; r — внутренний радиус изделия.

Зная необходимую прочность наружной поверхности трубы R' , можно рассчитать требуемое число оборотов центрифуги

$$n_{\text{тр}} = \sqrt{\frac{F_{\text{нар}} 3g \cdot 302R'}{\rho \pi^2 (R^3 - r^3)}} \cong \sqrt{\frac{F_{\text{нар}} R'}{\rho (R^3 - r^3)}}. \quad (7.36)$$

Внутреннее давление, развивающееся в формуемой массе в результате действия центробежных сил, непосредственно воспринимается жидкой фазой. В результате этого возникает избыточное гидростатическое давление, под влиянием которого жидкость фильтруется. Фильтрация будет проходить до тех пор, пока сопротивление движению жидкости в поровых каналах формуемой смеси за счет ее уплотнения не сравняется с избыточным гидростатическим давлением. Гидростатическое давление изменяется по толщине изделия неравномерно. Оно минимально на внутренней поверхности и максимально на внешней. Поэтому вначале жидкость наиболее полно отжимается из наружных слоев массы и все в меньших количествах по мере приближения к внутренней поверхности. Отсюда и водосодержание массы неравномерно — оно больше во внутренних слоях и меньше во внешних. Так, для бетонных изделий из-за неравнопрочности внутренних и внешних слоев (в результате разного В/Ц) это имеет первостепенное значение.

Неравноплотность центрифугированной массы выражается не только структурной неоднородностью гидратированного связующего за счет отжатия из него воды и уменьшения толщины гидратных оболочек, но и в характере распределения зерен заполнителя по толщине изделия. Более крупные зерна за счет большей центробежной силы прижимаются к наружной поверхности, а мелкие зерна концентрируются ближе к внутренним слоям. Поэтому центрифугированные массы в отличие от вибрированных имеют меньшую однородность распределения зерен заполнителя по толщине изделия. Этот органический недостаток центрифугированных масс может быть устранен при последнем уплотнении.

При малых толщинах последовательно загружаемых и уплотняемых слоев отдельные фракции заполнителя распределяются в них более равномерно. В процессе уплотнения последующего слоя крупные зерна заполнителя внедряются во внутреннюю часть предыдущего слоя и вытесняют более дисперсную часть связующего во внешнюю часть второго слоя. Аналогичные явления происходят и при уплотнении последующих слоев. В результате достигается более равномерная структура смеси по толщине изделия. Число слоев при раздельном их уплотнении при прочих равных условиях зависит от толщины стенки: чем она больше, тем больше должно быть уплотняемых слоев. Последний способ формирования целесообразно применять к смесям, имеющим большую разницу в мас-

сах отдельных частиц (например, бетонные смеси) и нежелательно для смесей, масса отдельных частиц которых близка по величине.

Уплотнение смеси методом центрифугирования производят в специальных машинах, называемых центрифугами. По способу закрепления форм различают центрифуги роликовые со свободным вращением форм, ременные с подвеской формы на бесконечных ремнях, огибающих холостые и приводные шкивы, и осевые или шпиндельные (рис. 7.23, II).

Осевые центрифуги имеют высокие скорости вращения и позволяют уплотнять более жесткие смеси. Недосток их — сложность конструкции и трудность загрузки смеси в форму. Применяются они для производства относительно коротких изделий.

Роликовые центрифуги проще в изготовлении, однако их недостаток — значительный шум при работе. Кроме того, они требуют высокой степени сбалансированности формы, в противном случае возможно сбрасывание формы со станка. Ременные центрифуги менее чувствительны к балансировке форм, менее шумны при работе, но требуют повышенного ухода из-за износа ремней.

Полусухое прессование. Метод получил широкое распространение при изготовлении различного рода керамических изделий — кирпича, черепицы, бруса, плитки, огнеупорной керамики, небольших по величине бетонных изделий — плитки, бордюрного камня, а также силикатного кирпича.

Сочетание метода прессования с предварительной виброобработкой дает хорошие результаты и при изготовлении крупных железобетонных изделий, позволяя снизить прессующие давления в 2...4 раза по сравнению с обычным прессованием. Вибропрессование бетона наиболее широко используют при изготовлении напорных железобетонных труб методом гидропрессования.

При полусухом прессовании влажность прессуемой массы и удельное давление, прикладываемое к ней, в различных производствах неодинаково. Так, при производстве обычного керамического кирпича влажность составляет 8...12% при удельном давлении 10...20 МПа, огнеупорных изделий соответственно — 4...11% и 15...40 МПа; силикатный кирпич формуют с влажностью 7...9% при удельном давлении до 25 МПа, а бетонные изделия при влажности 7...10% прессуют при давлении 10...15 МПа. При предварительном вибрировании давление прессования в последнем случае снижается до 2,5...5 МПа.

Влажность массы является важным, но не единственным фактором, определяющим величину удельного давления.

На рис. 7.24 представлена принципиальная схема полусухого прессования. Масса засыпается на нижний штемпель 1 в пресс-форму 2 на высоту h_1 и уплотняется верхним штемпелем

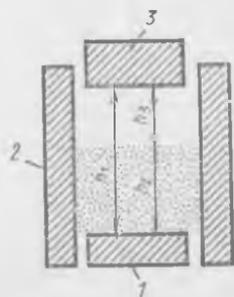


Рис. 7.24. Принципиальная схема полусухого прессования

З до h_2 , при этом штампель опускается на величину h_3 . Процесс прессования можно разделить на несколько стадий, отличающихся поведением структурных элементов массы:

1) минеральные частицы заполнителя, поверхности которых в зависимости от величины начальной влажности могут иметь пленку влаги или она отсутствует;

2) связка, представляющая собой смесь коллоидных частиц с большими или меньшим количеством свободной и связанной влаги.

В начальной стадии уплотнения массы, засыпанной в пресс-форму, рыхло уложенные частицы перемещаются главным образом в направлении движения прессующего штампеля с заполнением крупных пор. На этой стадии деформация отдельных зерен практически отсутствует. При достижении некоторого давления структурные элементы массы занимают относительно устойчивое положение и дальнейшее их уплотнение определяется деформативными процессами.

Дальнейшее увеличение нагрузки приводит к возникновению пластических деформаций в связке и упругих деформаций в заполнителе с частичным его разрушением большей частью поверхностного характера — срезание выступов, шероховатостей и т. п. С увеличением давления рост упругих деформаций продолжается, при этом растет не только абсолютная величина, но и их доля в



Рис. 7.25. Характер деформации системы при прессовании:

1 — общая в процессе сжатия; 2 — остаточная после снятия давления; 3 — упругая; P — давление прессования; δ — деформации сжатия при прессовании

общем сжатии системы (рис. 7.25). При некотором давлении обратимая деформация системы становится преобладающей.

Большое значение для формирования структуры полуфабриката имеет не только поведение зерен сжимаемого заполнителя, но и явления, происходящие в жидкой и газообразной составляющих системы.

Под действием возникающих усилий рыхлосвязанная вода диффузионного слоя (см. рис. 7.21) отжимается в поровое пространство.

По мере сжатия массы и уменьшения общего объема пор доля жидкости в этом объеме растет. Если начальное содержание жидкости велико, то ее объем может оказаться равным общему объему пор. Такое состояние системы называют критической плотностью, а давление, при котором оно наступает, — критическим $P_{кр}$. При переходе за критическое давление дальнейшее сжатие системы целиком сводится к обратимой упругой деформации (см. рис. 7.25).

В начале сжатия массы воздух, содержащийся в рыхлонасыпанной смеси, вытесняется наружу и удаляется через зазоры между штемпелем и пресс-формой, поэтому больших давлений в порах не возникает. По мере роста давления воздухопроводящие каналы сужаются, заполняются отжатой влагой и частично вообще закрываются. Процесс вытеснения воздуха замедляется, при этом давление остающегося «запрессованного» воздуха сильно возрастает по мере уменьшения объема пор. Коэффициент запрессовки (отношение количества оставшегося воздуха в массе к его первоначальному количеству) при неблагоприятных условиях может достигать значительной величины (0,7) и увеличивается с возрастанием содержания в массе дисперсных и особенно глинистых частиц, скорости прессования, увеличением объема прессуемого изделия и почти не зависит от удельного давления прессования. Поведение жидкой и газообразной фаз при прессовании осложняется еще и тем, что удельное давление, прилагаемое к массе у поверхности прессующего штампея, уменьшается по мере удаления от него под влиянием сил внешнего трения материала о стенки формы.

С увеличением хода штампея (h_3 на рис. 7.24) высота прессовки h_2 уменьшается, сила трения массы о стенки формы возрастает и давление внутри формируемого изделия падает тем больше, чем дальше уплотняющиеся слои находятся от поверхности приложения нагрузки. Отсюда плотность сырца по толщине прессовки неодинакова: она максимальна со стороны прессующего штампея и минимальна в наиболее удаленных от него слоях изделия.

По П. П. Баландину, это изменение удельного давления прессования по толщине сырца определяется по уравнению:

$$p_h = p e^{-kh/R}, \quad (7.37)$$

где p_h — удельное давление на расстоянии h от прессующего штампея; p — удельное давление на поверхности штампея; k — коэффициент, зависящий от внутреннего трения в массе и ее трения о стенки формы, $k = \varphi(f)$; f — коэффициент внешнего трения массы о стенки; R — гидравлический радиус сечения сырца, $R = 2A/P$; A — площадь сечения сырца; P — его периметр.

Перепады давления и плотности по толщине изделия могут быть снижены пластификацией массы, повышением их влажности, введением поверхностно-активных добавок, смазкой пресс-форм. На равномерность прессовки большое влияние оказывает режим прессования.

Двустороннее прессование уменьшает степень неравномерности изделия по плотности, поскольку h в формуле (7.37) уменьшается вдвое.

В общем случае зависимость пористости сырца от давления описывается уравнением А. С. Бережного:

$$П = a - b \lg p, \quad (7.38)$$

где $П$ — истинная пористость; p — удельное давление прессования; a и b — постоянные.

Совмещение уравнений Бережного и Баландина позволяет вывести зависимость пористости элементов объема сырца от их расстояния до прессующего штемпеля

$$P_h = P + \lg lbKh/R = P + 0,43bKh/R = P + ChP/A. \quad (7.39)$$

Следовательно, при уменьшении периметра и увеличении площади прессования уменьшается перепад пористости по его толщине.

Для получения высокоплотных бездефектных изделий применяют ступенчатое прессование (рис. 7.26). При первичной подпрессовке высота засыпанной в форму массы изменяется при увеличении давления

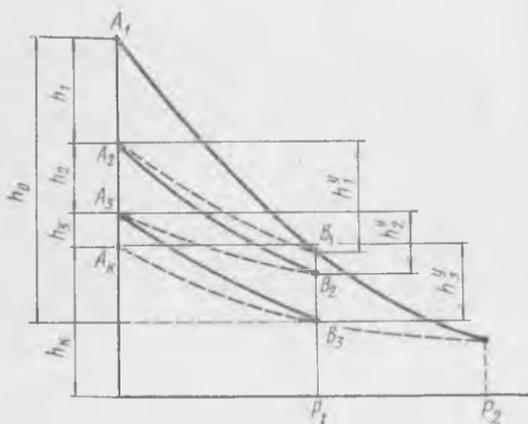


Рис. 7.26. Изменение упругого последствия при ступенчатом прессовании

до p_1 на величину h_1 по линии A_1B_1 . При снятии давления масса за счет упругого последствия расширяется на h_1^y по линии B_1A_2 . Вторичное нагружение до давления p_1 изменяет высоту прессовки на h_2 по линии A_2B_2 , а после снятия давления упругое расширение составляет h_2^y и происходит по линии B_2A_3 . При трехступенчатом прессовании общий ход штемпеля составит $h_1 + h_2 + h_3 + h_3^y = h_0$, а упругое последствие после третьей ступени составит h_3^y при общей высоте отпрессованного изделия h_k . Такую же конечную величину заготовки при одноступенчатом прессовании можно было бы получить лишь при давлении p_2 . Следовательно, ступенчатое прессование дает возможность получить равную осадку (или плотность) при существенно меньшем давлении и, кроме того, обеспечивает возможность более полного удаления воздуха в период разгрузки массы.

Характерным дефектом прессованных изделий являются так называемые трещины расслаивания, которые возникают на боковых гранях в направлении, перпендикулярном приложенному усилию. До недавнего времени считалось, что непосредственной причиной их возникновения является упругое расширение прессуемой массы. Последующие исследования показали, что трещины расслаивания образуются вследствие неравномерной степени спрессованности сырца по его толщине, приводящей к неравномерному расширению после снятия давления и, как результат этого, к относительному смещению слоев. Экспериментально показано, что иногда при большом упругом расширении трещины не возникают,

а при меньшем расширении они образуются. Считается, что для предотвращения расслаивания прессовок следует стремиться к повышению однородности массы по крупности зерен и влажности, отощению массы грубозернистыми отощителями и снижению ее влажности, снижению величины прессового давления и вакуумированию массы, применению двустороннего, ступенчатого и замедленного прессования. Последний фактор в значительной степени влияет на равноплотность и упругое последствие прессовки. Лучшие результаты получают при плавном приложении нагрузки, худшие — при ударном прессовании (рис. 7.27).

Разновидностью полусухого прессования является метод гидростатического (иногда называемый изостатическим) прессования. Сущность его заключается в том, что прессовое давление создается жидкостью и передается на массу через резиновую оболочку. При этом возможны два способа уплотнения массы (рис. 7.28): 1) масса помещается в резиновую

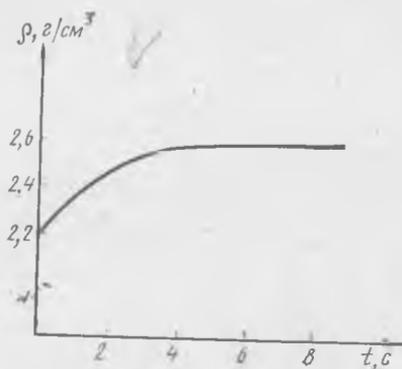


Рис. 7.27. Влияние продолжительности прессования на плотность ρ шампонируемых масс

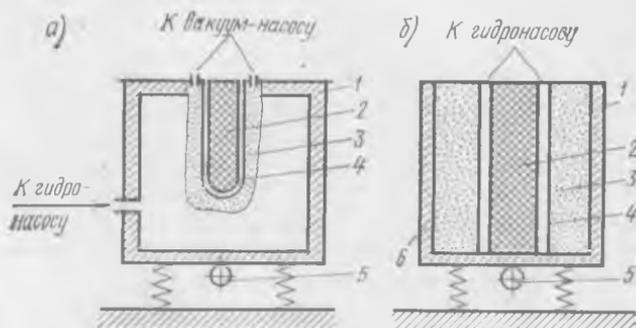


Рис. 7.28. Принципиальная схема гидропрессования:

а — внешняя опрессовка; б — внутренняя опрессовка; 1 — внешняя стенка пресс-камеры; 2 — сердечник; 3 — прессуемая масса; 4 — резиновая оболочка; 5 — вибратор; 6 — наружная стенка формы

оболочку и гидростатическое давление действует на внешнюю поверхность оболочки, прижимая массу к внутреннему сердечнику; 2) масса помещается между резиновой оболочкой и внешней стенкой формы, а в резиновую оболочку, расположенную у сердечника, нагнетается жидкость. Оба способа нашли достаточно широкое применение, причем первый более распространен в керамической промышленности для получения специальных изделий сложной

конфигурации, второй — в промышленности сборного железобетона для формования труб. Оба способа часто применяются совместно с вакуумированием массы и ее укладкой при вибрации.

Основным преимуществом гидростатического прессования является приложение прессующего давления одинаковой величины ко всей поверхности формируемого изделия при отсутствии потерь на внешнее трение.

При гидростатическом прессовании происходит саморегулирование плотности, так как уплотнение идет независимо для каждой зоны. Если масса в данной зоне засыпана менее плотно, то она при соответствующем давлении жидкости уплотняется интенсивнее до тех пор, пока эта зона не достигнет плотности остальной части прессовки, после чего происходит дальнейшее равномерное уплотнение всего объема.

Другой разновидностью метода полусухого прессования является горячее прессование. Горячее прессование при высоких температурах (свыше 1000°C) применяют для производства специальных видов технической и огнеупорной керамики, частично совмещая процесс формования изделий с первичным обжигом. Значительно более низкий нагрев, в частности нагревание пресс-форм, используют при производстве строительной керамики для уменьшения перепадов давления и плотности прессовок.

В промышленности сборного железобетона применение горячей воды при виброгидропрессовке труб позволяет интенсифицировать процессы твердения вяжущего и сократить цикл тепловлажностной обработки изделий за счет предварительного нагрева в процессе формования.

Но наиболее широкое распространение горячее прессование получило в промышленности полимерных строительных материалов. Его применяют при производстве древесно-стружечных плит, бумо- и стеклопластиков, теплоизоляционных термопластов. Разогрев массы вызван необходимостью перевода термопластичного полимерного связующего в вязкотекучее состояние, которое также зависит от приложенного давления. Степень разогрева определяется видом полимерного связующего и характером изменения его вязкопластических свойств от температуры и давления.

Процессы, происходящие при прессовании массы, принципиально не отличаются от описанных выше, за исключением производства газонаполненных пластмасс. В этом случае давление прессования должно согласовываться с процессом газовыделения, а он, в свою очередь, с температурными режимами, определяющими газоудерживающую способность массы.

Упругое последствие прессуемых полимерных композиций легче поддается регулировке за счет рационально выбранных режимов охлаждения.

Пластическое формование. Этот метод нашел применение главным образом в промышленности керамической, полимерных строительных материалов, иногда при производстве мелких бетонных изделий.

Формование изделий из теста пластической консистенции осуществляется ленточным формованием (экструзией), реже штамповкой в формах и в отдельных случаях ручным формованием (лепкой) керамики.

В технологии керамики к массам пластической консистенции относятся дисперсные системы, у которых сумма сил внутреннего трения (когезия) больше сцепления с поверхностью большинства материалов (адгезия).

Наиболее распространено ленточное формование в шнековых прессах (рис. 7.29). Отформованная масса непрерывно выходит из мундштука, а затем разрезается на заготовки. Основным недостатком технологии ленточного формования является наличие в полуфабрикате свилей и продольных трещин, возникающих в результате крутящих усилий, создаваемых лопастями шнека и трением массы о стенки выходного мундштука.

Способность массы формоваться определяется как конструктивными особенностями формующего агрегата, так и структурно-механическими свойствами самой массы. Последние зависят как от химико-минералогического состава сырья, так и от влажности массы, вида и количества отошающих и пластифицирующих добавок.

При продавливании массы через мундштук между массой и стенкой пресса возникают тормозящие усилия и тем они выше, чем больше скорость движения массы, коэффициент внешнего трения, конусность головки пресса и длина мундштука. В головке пресса и мундштуке, а также на некотором расстоянии от выхода из него центральные слои массы в результате этих тормозящих усилий движутся с большей скоростью, чем внешние, соприкасающиеся со стенками формующей машины.

Значение структурно-механических характеристик формируемых масс для процесса формования заключается в том, что зависимость между значением напряжения сдвига и степенью разрушения структуры позволяет установить допускаемые напряжения сдвига в процессе формования.

Если напряжения сдвига, возникающие между отдельными слоями массы в процессе формования, превышают прочность сцепления между отдельными частицами массы, то происходит отрыв слоев внутри бруса, выходящего из мундштука пресса. Такие дефекты в структуре отформованной массы при дальнейших технологических операциях (сушке и обжиге) могут вызвать появления трещин в изделии.

Кроме продольных трещин, вызванных различием скоростей движения периферийных и центральных слоев бруса, значительным дефектом структуры бруса является свиль.

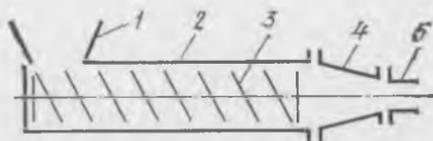


Рис. 7.29. Принципиальная схема шнекового пресса:

1 — загрузочная воронка; 2 — корпус; 3 — шнек; 4 — переходная головка; 5 — мундштук

Осевое движение массы в корпусе шнекового пресса происходит не прямолинейно. Вместе с поступательным масса имеет вращательное движение, частично проворачиваясь относительно внутренней поверхности корпуса. Скорость осевого движения массы в корпусе неравномерна: она минимальна у ступицы шнековых лопастей и поверхности корпуса и максимальна в промежуточной части. В итоге такого характера движения масса представляет собой спираль. Выпорной лопастью шнека масса разрезается и в виде двух спиралей выжимается в переходную головку пресса. Если липкость массы и противодействие, возникающее в головке и мундштуке пресса, недостаточны для срастания двух потоков, то в сформированном изделии в скрытом виде возникает S-образная трещина, проявляющаяся при сушке и обжиге. Если сдвиговые усилия, возникающие в массе при ее вращении, превысят прочность сцепления между отдельными частицами массы, то произойдет разрыв ее по спиральной поверхности.

Таким образом, в любом случае нарушение сплошности массы как в самом прессе, так и на выходе из него происходит тогда, когда возникающие в ней нарушения превышают предел текучести массы. Избежать этих напряжений можно как правильным проектированием самого шнека (расстояние в свету между осью и стенкой шнека, подбором соответствующих скоростей вращения шнека, выбором уклона головки шнека и длины мундштука и т. д.), так и изменением реологических характеристик массы, а также применением технологических приемов, уменьшающих внешнее трение массы (применение соответствующих покрытий внутренних поверхностей шнековых машин, ПАВ и т. д.).

В общем случае склонность массы к свилеобразованию можно выразить

$$C_{св} = f(P, f_{внеш.т}/f_{внут.т}, C, A), \quad (7.40)$$

где P — давление прессования; $f_{внеш.т}$, $f_{внут.т}$ — соответственно коэффициенты внешнего и внутреннего трения; C — связанность; A — липкость, прилипаемость, определяемая адгезионными свойствами контактируемых однородных слоев массы.

Усилие выдавливания через мундштук зависит от структурно-механических свойств массы:

$$P = \frac{\pi(D-d)D^2}{d \operatorname{tg} \alpha} \left(\frac{4v}{d} \eta_{пл}^{min} + \frac{2}{3} \tau_0 \right), \quad (7.41)$$

где D — диаметр цилиндра; d — приведенный диаметр выходного отверстия мундштука; α — угол конуса образующейся воронки при установившемся потоке $\alpha \simeq 45^\circ$; v — истинная скорость истечения массы; $\eta_{пл}^{min}$ — вязкость предельно разрушенной структуры; τ_0 — динамическое предельное напряжение сдвига.

Формулы 7.40 и 7.41 хорошо согласуются, если интерпретировать $f_{внут.т}$, C , A , как $\eta_{пл}^{min}$ и τ , что для рассматриваемых масс вполне возможно. Тогда при прочих равных условиях, способность массы к свилеобразованию зависит от соотношения диаметров

щечка и мундштука, скорости истечения массы и коэффициента трения массы о стенки формирующего агрегата, что согласуется с практическими результатами.

Метод пластического формования экструзией и штамповкой в формах широко распространен и в производстве полимерных строительных материалов. Этим методом формируются различные погонажные изделия и трубы (поручни, плитусы, полиэтиленовые и поливинилхлоридные трубы). Назначаемые при этом температурные режимы определяются теми же принципами, что и при прессовании.

Метод литья. В керамике метод литья применяется для изготовления сложных по форме тонкостенных изделий. Масса заливается в гипсовые формы, в которых происходит «набор черепка» — процесс образования на стенках формы относительно плотного, частично обезвоженного осадка.

Скорость набора черепка зависит от скорости влагообмена между литьевой массой и формой, т. е. скоростью отсоса влаги. Процесс «набора черепка» можно описать математически. Пусть x — толщина слоя черепка, а dx — прирост ее за время dt (рис. 7.30, а). По мере возрастания x величина dx будет уменьшаться вследствие поглощения воды поддоном из-за тормозящего действия увеличивающегося фильтрующего слоя.

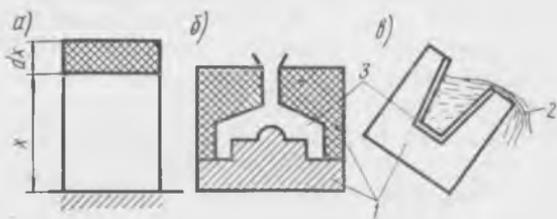


Рис. 7.30. Способы литья:

a — к расчету процесса «набора» черепка; *б* — наливной; *в* — сливной; 1 — гипсовая форма; 2 — шликер; 3 — плотный осадок

Если влагопоглощающая способность поддона постоянна, то

$$dx = \frac{a}{x} dt, \quad (7.42)$$

где a — константа поддона, зависящая от влагоаккумулирующей способности его и потенциала переноса влаги.

Отсюда

$$t = \frac{1}{a} \int x dx = \frac{1}{2a} x^2 \text{ или } x = \sqrt{2at}. \quad (7.43)$$

В промышленности применяют два способа литья: наливной и сливной (рис. 7.30, б, в). При наливном способе шликером заполняют разборную форму с высокой влагопоглощающей способностью. При сливном способе излишек шликера сливается из формы пос-

ле того, как в результате отсоса влаги стенками формы образуется черепок заданной толщины. Достоинством сливного способа является относительная простота конструкции формы, меньшее количество технологических операций по формированию изделий, облегчение условий труда и возможность механизации и автоматизации процесса. Недостаток этого способа — повышенный расход шликера, замедленный по сравнению с наливным способом процесс набора черепка (вследствие меньшей поверхности соприкосновения заготовки со стенками формы), неравномерность толщины изделия.

Как при сливном, так и при наливном литье после окончания основного фильтрационного процесса диффузия воды из заготовки в форму продолжается. Этот процесс сопровождается уменьшением влажности заготовки и, следовательно, уменьшением ее объема (усадкой), что облегчает отделение заготовки от формы.

Литье изделий в гипсовые формы имеет ряд недостатков: быстрый износ форм, их малую ударную прочность и быстрое старение. Последнее связано с накоплением в их порах тончайших частиц керамического материала и вводимых в шликер растворимых добавок, которые препятствуют быстрому отсосу влаги из заготовки.

В последнее время разработан способ отливки заготовок в металлические формы. При использовании металлических форм предложено применять электрофоретический метод обезвоживания шликера, основанного на способности твердых частиц глины, имеющих отрицательный заряд, двигаться по направлению к положительно заряженной стенке формы при наложении электрического поля. Способ проходит промышленную проверку на ряде предприятий.

Наибольшее распространение способ литья получил при производстве ячеистых теплоизоляционных и теплоизоляционно-конструктивных материалов. В керамике — это производство пенового ультралегковеса, в промышленности сборного железобетона — ячеистые газо- и пенобетоны, при производстве органических строительных материалов — разнообразные пенопласты. Способ имеет две разновидности: 1) литая масса смешивается с предварительно приготовленной пеной (пенный способ); 2) масса вспучивается в результате разложения газообразующего компонента, специально вводимого в смесь (газовый способ). В обоих случаях масса заливается в форму, где и стабилизируется либо за счет схватывания, твердения или полимеризации связующего (ячеистые бетоны и пластмассы), либо за счет глиняной связки при ее высушивании и последующем обжиге (пенокерамика).

Вопрос получения и стабилизации пено- и газомасс весьма сложен и специфичен для отдельных производств, поэтому он подробно рассматривается в специальных технологических курсах. Здесь лишь целесообразно отметить, что образование ячеистых масс и их стабилизация тесно связаны с вязкопластическими характеристиками массы и их изменением во времени. Во всех случаях со-

хранность формы полученного изделия из минеральных композиций, подчиняющихся закону Шведова — Бингама, обеспечивается при

$$h = K\tau_0/\rho, \quad (7.44)$$

где h — высота изделия; K — коэффициент, зависящий от пластических свойств массы, для пластичных масс $K=2$; τ_0 — предельное напряжение сдвига массы; ρ — плотность.

§ 7.6. Тепловая обработка

Тепловая обработка на основных стадиях технологического процесса заключается в сушке материала или полуфабриката и его последующем обжиге, получении минеральных расплавов для последующей отливки строительных изделий или раздува расплава в вату, получения расплавов полимеров и дальнейшего формования из них изделий, гидротермальной обработке бетонов и полимерных строительных материалов при атмосферном или повышенном давлении.

Кроме того, тепловая обработка применяется для стабилизации размеров и снятия напряженного состояния в изделиях. Ряд полимерных строительных материалов после их формования находится в неравновесном, напряженном состоянии. Процесс релаксации напряжений протекает весьма длительно, и в период эксплуатации в изделиях могут возникать трещины, коробления, значительные усадки. Поэтому готовые изделия нагревают, выдерживают и охлаждают при определенном температурном режиме для быстрого снятия напряженного состояния.

Вопросы тепловой обработки, связанные с получением расплавов, являются специфическими и рассматриваются в соответствующих курсах.

Теоретические основы процессов сушки. Характер изменения физико-механических свойств материалов в процессе сушки определяется *количеством влаги, содержащимся в материале, формой ее связи с материалом, режимами сушки.*

По предложению П. А. Ребиндера, в настоящее время общепринятой является энергетическая классификация форм связи влаги с материалом. Согласно ей, влага связана с материалом *химической связью* и в точных количественных соотношениях входит в состав молекул, *физико-химической связью*, удерживающей влагу адсорбционными и осмотическими силами, и *физико-механической связью*, удерживающей влагу за счет сил поверхностного натяжения и капиллярного давления, а также влагу, *механически захваченную* (структурную) при гелеобразовании.

Влагу, связанную с материалом физико-механическими силами, называют свободной в отличие от связанной, имеющей химическую (химически связанная) и физико-химическую (физически связанная) формы связи с материалом. Иногда из понятия свободной влаги исключают микрокапиллярную влагу, относящуюся также к

физико-механической форме связи. В капиллярно-пористых материалах преобладает микро- и макрокапиллярная влага, которая легко удаляется при сушке без существенного изменения объема материала. В коллоидно-капиллярно-пористых материалах содержится осмотическая и капиллярная влага, поэтому материал имеет значительную усадку при сушке и набухает при увлажнении. Таким образом, при сушке из материала удаляется физико-химическая и физико-механическая влага. Химически связанная влага в процессе сушки не удаляется.

Общее количество влаги в материале и соотношение между свободной и связанной влагой зависят от технологических параметров изготовления изделий, степени дисперсности частиц и их химической активности, минералогического и химического составов материала.

Материал, подвергаемый сушке, рассматривается как трехфазная система, состоящая из абсолютно сухого материала (содержащего только химически связанную влагу), воды и воздуха, содержащихся в порах.

Для материала по отношению к окружающей среде различают три состояния: *влажностное*, при котором материал отдает влагу в окружающую среду; *равновесное*, при котором влагообмен между материалом и средой отсутствует; *гигроскопическое*, при котором материал насыщается влагой из окружающей среды.

Количественными характеристиками материала, характеризующими содержание влаги, являются относительная ($W_{от}$) и абсолютная влажность (W_a) или влагосодержание (U) и выражаются следующими зависимостями

$$W_{от} = \frac{m_{вл} - m_{сух}}{m_{вл}} 100\%; \quad (7.45)$$

$$W_a = \frac{m_{вл} - m_{сух}}{m_{сух}} 100\%; \quad (7.46)$$

$$U = \frac{m_{вл} - m_{сух}}{m_{сух}}, \quad (7.47)$$

где $W_{от}$, W_a — соответственно относительная и абсолютная влажности материала; U — влагосодержание; $m_{вл}$, $m_{сух}$ — соответственно масса влажного и сухого материала.

Зависимость между абсолютной и относительной влажностью (%) имеет вид

$$W_a = 100W_{от}/(100 - W_{от}) \text{ или } W_{от} = 100W_a/(100 + W_a) \quad (7.48)$$

Влажность материала, соответствующая равновесному состоянию, называется *равновесной* влажностью W_p , а влажность материала, находящаяся при данной температуре в равновесии с окружающим воздухом, полностью насыщенным водяными парами ($\varphi = 100\%$), — *гигроскопической* W_r . На рис. 7.31 показаны кривые

равновесной влажности (изотермы сорбции и десорбции) подмосковных глин, откуда следует, что равновесная влажность W_p растет с повышением относительной влажности воздуха φ и понижением его температуры.

По изотермам сорбции А. В. Лыковым установлено, что в интервале $10 > \varphi > 0\%$ протекает мономолекулярная адсорбция влаги с выделением теплоты; на участке $90 > \varphi > 10\%$ формируется полимолекулярный слой; участок $100 > \varphi > 90\%$ характеризуется интенсивным поглощением влаги без выделения теплоты, что свидетельствует о связи влаги с материалом капиллярными силами. Следовательно, анализ изотерм сорбции и десорбции позволяет установить форму связи влаги с материалом и даст представление о рациональном выборе режима его сушки.

Характер изменения влажности (влагосодержания) материала, температуры теплоносителя, поверхности и центра изделия во времени обычно представляются в виде графиков, носящих название диаграмм процесса сушки (рис. 7.32).

Кривая А, выражающая зависимость $U = f(t)$, носит название *кривой сушки*; кривую В, выражающую зависимость $dU/dt = f'(U)$, называют *кривой скорости сушки*.

При сушке материала воздухом или дымовыми газами с постоянной температурой (линия Г на диаграмме) и скоростью движения в соответствии с характером изменения кривых скорости сушки и температурных кривых материала (линия В на диаграмме) процесс сушки можно разделить на три периода: 1) *период прогрева материала* с нарастанием его температуры до температуры мокрого термометра t_m и увеличением скорости сушки до некоторой максимальной величины $(dU/dt)_{max}$; 2) *период постоянной скорости* сушки, которая по величине близка к скорости испарения воды с открытой поверхностью. Температура

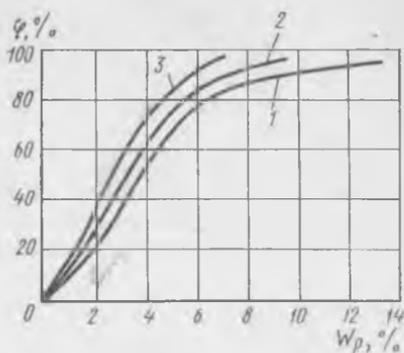


Рис. 7.31. Изотермы сорбции (десорбции) подмосковных глин при температурах:

1 — 25°C; 2 — 35°C; 3 — 57°C

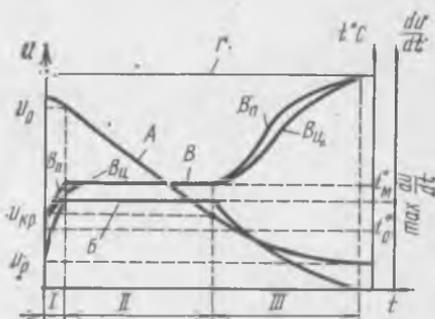


Рис. 7.32. Диаграмма процесса сушки:

I, II, III — периоды скорости сушки; А — кривая сушки; В — кривая скорости сушки; В — температура материала (B_n — поверхности, B_c — центра); Г — температура теплоносителя; t_m — температура мокрого термометра; u_0 , $u_{кр}$, u_p — соответственно начальное, критическое и равновесное влагосодержание; t_0 — температура материала

материала в этот период постоянна и равна температуре мокрого термометра; 3) *период падающей скорости сушки*, наступающей при достижении материалом критического влагосодержания $U_{кр}$, при этом влажность на поверхности материала соответствует гигроскопической W_r .

Температура поверхности материала (линия $B_{п}$) растет быстрее, чем в центре (линия $B_{ц}$). Снижение скорости сушки связано с испарением связанной влаги.

В процессе сушки величина $U_{кр}$ имеет важное значение и связана с изменением размеров изделий в процессе сушки, т. е. усадкой материала. В большинстве случаев усадка материала происходит в период постоянной скорости сушки и заканчивается к началу периода падающей скорости, т. е. при достижении $U_{кр}$. Исследованиями установлено, что критическая влажность зависит от режима сушки и размеров изделия. При повышении температуры и скорости движения теплоносителя $U_{кр}$ повышается, а продолжительность периода постоянной скорости уменьшается. Увеличение φ уменьшает, а увеличение размеров изделий увеличивает критическую влажность.

Понятие критической влажности применимо к коллоидным и коллоидно-капиллярно-пористым материалам, ибо только у них (но не капиллярно-пористых) в процессе сушки наблюдаются значительные *усадки*. Механизм усадки этих материалов обычно объясняют преобладанием сжимающих сил над силами отталкивания отдельных частиц в результате удаления свободной и рыхлосвязанной влаги в процессе сушки (см. рис. 7.20).

Различают абсолютную Δl и относительную δ линейные усадки

$$\Delta l = l_1 - l_2; \quad (7.49)$$

$$\delta = (l_1 - l_2) / l_1 = \Delta l / l_1, \quad (7.50)$$

где l_1 и l_2 — соответственно начальный и конечный размеры изделия.

Установлено, что размер изделия l и его влажность W связаны линейной зависимостью

$$l = l_0(1 + \alpha W), \quad (7.51)$$

где l_0 — линейный размер изделия после прекращения усадки; α — коэффициент линейной усадки, показывающий относительное уменьшение линейного размера изделия при уменьшении его влажности на 1%.

При сушке неизбежно неравномерное распределение влажности по сечению изделия — влажность наружных слоев меньше, чем внутренних, причем эта разница тем больше, чем дальше от влагоотдающей поверхности расположены рассматриваемые слои. Для раскрытия механизма усадки рассмотрим сушку одномерной пластины, боковые поверхности которой, кроме двух противоположных, надежно влагоизолированы.

Пусть через некоторый промежуток времени влагосодержание в пластине распределится по кривой симметричной по отношению

к центральной оси пластины (рис. 7.33, а). Предположим, что пластина состоит из бесконечно тонких, не связанных друг с другом полосок. По мере удаления влаги из полосок они претерпевают линейную усадку, пропорциональную влагосодержанию. Тогда размеры пластинок определялись бы кривой влагосодержания и их длина соответствовала бы размерам рис. 7.33, б. Но в действительности пластинки связаны друг с другом, и такой ступенчатой картины не получается: грани, лежащие на поверхности, сократились меньше, чем они должны были сократиться, а слои в центре сократились больше. В пластине появилось напряженное состояние. Поверхностные слои испытывают напряжения растяжения, а слои центра пластины — напряжения сжатия, что и показано на рисунке соответствующими знаками. Разницу между длиной полоски, которую она имела бы при свободном сокращении, и той длиной, которую она имеет в действительности, называют *недопущенной усадкой*. Одновременно в пластине будут два слоя, усадка которых соответствует их влагосодержанию, они не имеют недопущенной усадки и не испытывают напряжений. Такие слои называют *нейтральными плоскостями*.

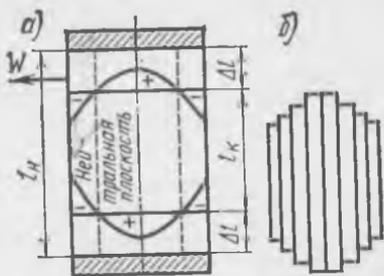


Рис. 7.33. Схема возникновения напряженного состояния неограниченной пластины при сушке

Как показали исследования, растягивающие напряжения на поверхности материала не приводят к растрескиванию. Материал растрескивается только в том случае, если возникшие за счет напряженного состояния (растягивающих и сжимающих усилий) касательные напряжения превысят допустимые для данного материала, определяемые его физическими свойствами.

Недопущенные усадки являются причиной возникновения трещин в изделии. Поверхностные трещины могут возникать в первом периоде сушки, а внутренние — во втором периоде.

Таким образом, усадка изделий — основное препятствие, ограничивающее быструю сушку, и является основным параметром при установлении оптимальных режимов сушки. Поскольку напряженное состояние в процессе сушки обуславливается неравномерным распределением влажности в материале, параметр, характеризующий поле влагосодержаний, может являться и критерием трещинообразования.

В качестве такого критерия обычно используют критерий Кирпичева

$$Ki = (\bar{U} - U) / U_0, \quad (7.52)$$

где \bar{U} , U и U_0 — среднее, локальное и начальное влагосодержание материала в процессе сушки.

Балансовое уравнение тепло- и массопереноса при сушке в развернутом виде можно написать, используя зависимости (5.44), (5.50) и (6.53):

$$\alpha(t_r^* - t_{им}^*) = r\rho_0 R_v \frac{dU}{dt} + \lambda \nabla t^* + i_1 a_m \rho_0 \nabla U + i_2' a_m \delta \rho_0 \nabla t^* + i_3' a_p \nabla P^* \quad (7.53)$$

Левая часть уравнения представляет собой конвективный поток теплоты от теплоносителя к материалу. Первый член правой части учитывает расход теплоты на испарение влаги, второй — расход теплоты на нагрев материала теплопроводностью, последующие — соответственно на нагрев материала вследствие движущейся в нем массы влаги за счет градиентов влагосодержания, температуры и давления.

Механизм распространения теплоты и влаги внутри материала разберем на следующем примере. Пусть в установке с непрерывно движущимся теплоносителем сушится неограниченная пластина толщиной $2R$ из только что сформованного коллоидного капиллярно-пористого материала. С открытых поверхностей пластины пачинает испаряться влага, что приведет к разнице влагосодержаний в центре и на ее поверхности. Так как теплота подводится с поверхности, то наблюдается перепад температур между поверхностью пластины и ее центром.

Помимо разности температур и влагосодержаний между поверхностью и центром пластины будет существовать и разность давлений. Для объяснения этого рассмотрим изолированный пузырек воздуха, находящийся в капилляре, заполненном влагой (рис. 7.34).



Рис. 7.34. К объяснению избыточного давления во внутренних областях материала:

1 — капилляр, заполненный влагой; 2 — пузырек воздуха

Перемешивание массы и формирование изделия происходят при атмосферном давлении, которое складывается из парциального давления сухого воздуха $P'_{с.в}$ и парциального давления водяного пара $P'_{в.п}$. Согласно известным физическим законам, в капилляре существует некоторое избыточное давление, которое распространяется и на пузырек воздуха, находящийся в капилляре. Но пузырек находится в заполненном водой капилляре и, следовательно, относительная влажность его $\varphi = 100\%$, а в пузырьке $\varphi_{II} < 100\%$. Тогда, по закону Дальтона, в пузырек начнет испаряться влага до достижения $\varphi = 100\%$.

Поэтому через некоторый промежуток времени в пузырьке установится общее давление, которое будет превышать капиллярное давление на $\Delta P'_{в.п}$ за счет испарившейся влаги вследствие разницы относительных влажностей воздуха и капилляра, т. е.

$$P_{II} = P'_{с.в} + P'_{в.п} + \Delta P'_{в.п} > P_K > P. \quad (7.54)$$

* В правой части уравнения указаны абсолютные значения слагаемых.

Но на поверхности пластины избыточное давление существовать не может, поэтому оно релаксируется и тем больше, чем ближе находится защемленный пузырек от поверхности. Исследования показывают, что давление в центре пластины $P_{ц}$ зависит от величины и характера пористости материала, его влагосодержания, режимов сушки. Характерная кривая представлена на рис. 7.35.

Если по оси y , проходящей через центр пластины, отложить значения влагосодержания, температуры и давления, а по оси x — расстояние от центра пластины до ее поверхности, то характер изменения U , t и P в различные периоды сушки можно представить в виде кривых, показанных на рис. 7.36, *а, б, в*.

Приняв направление векторов градиентов от участков с меньшим потенциалом к большему, можно определить направление потоков массы за счет этих градиентов в каждый конкретный период сушки.

В первый период влагосодержание и давление больше в центре материала, поэтому их градиенты направлены от поверхности к центру, а поток массы — от центра к поверхности. Температура в этот период выше на поверхности и, следовательно, градиент направлен от центра к поверхности, а поток массы наоборот (рис. 7.36, *а*). Если принять потоки влаги от центра к поверхности (т. е. способствующие сушке) положительными, а препятствующие сушке — отрицательными, то выражение для суммарного потока влаги в первый период

$$q_m = q_{mu} + q_{mp} - q_{mt}. \quad (7.55)$$

Во втором периоде градиенты давлений и влагосодержаний и, следовательно, потоки влаги за счет этих градиентов сохраняют свое направление. Спустя некоторое время после начала второго периода температуры центра и поверхности выравниваются (см. рис. 7.32) и градиент температур, а следовательно, и поток влаги за счет этого градиента прекращается. Тогда выражение для суммарного потока влаги в этот период (за исключением начального промежутка времени) примет вид

$$q_m = q_{mu} + q_{mp}. \quad (7.56)$$

Спустя незначительное время после начала третьего периода давление в центре пластины очень незначительно и либо меняет знак (т. е. наблюдается небольшое разрежение за счет конденсации влаги из теплоносителя, проникшего в поры материала), либо вообще отсутствует, т. е. q_{mp} близок к нулю. Градиенты влагосодержа-



Рис. 7.35. Характерная кривая изменения давлений в образце в процессе сушки

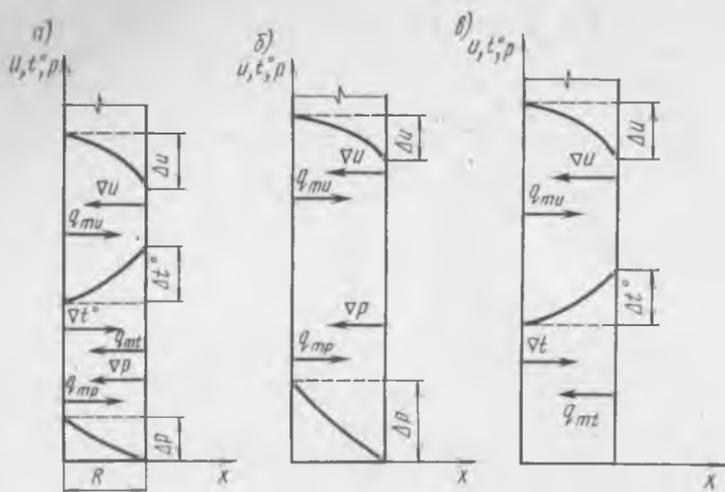


Рис. 7.36. К объяснению механизма тепло- и массопереноса в процессе сушки: а — период подъема температур; б — период изотермической выдержки; в — период охлаждения; ∇u ; ∇t ; ∇p — соответственно, градиенты влагосодержания, температуры и давления; q_{mu} ; q_{mt} ; q_{mp} — соответственно частые потоки влаги за счет этих градиентов

ния и температуры имеют то же направление, что и в первом периоде, следовательно, для суммарного потока влаги можно написать

$$q_m = q_{mu} - q_{mt}. \quad (7.57)$$

Рассмотрение суммарных потоков влаги по отдельным периодам дает возможность сделать важные практические выводы и предложить способы ускорения процесса сушки.

Согласно уравнению (7.53), скорость удаления влаги с поверхности материала при прочих равных условиях определяется разностью парциальных давлений водяных паров на поверхности материала и в окружающей среде. Следовательно, влагосъем с поверхности можно интенсифицировать, увеличив эту разность, что практически достигается снижением влагосодержания теплоносителя, увеличением скорости его движения или повышением температуры.

Но, согласно (7.52), увеличение влагосъема (соответственно уменьшение локального влагосодержания U) изменяет критерий трещиностойкости кирпича в худшую сторону, что неизбежно приведет к появлению дефектов в изделиях в виде трещин, короблений и т. п. за счет увеличения недопущенных усадок. Для предотвращения этого необходимо увеличить скорость движения влаги из внутренних слоев к наружным. Анализ механизма влагообмена внутри материала позволяет утверждать, что изменение направления градиента температур будет способствовать увеличению влагообмена между центром и поверхностью материала вследствие изменения направления движения потока влаги.

Если в процессе перемешивания смеси и формования изделия материал будет нагрет до температуры выше предполагаемой температуры сушильного агента, то при помещении изделия в сушилку его поверхность через некоторое время охладится до температуры теплоносителя, а его внутренние слои будут иметь температуру выше наружной. Тогда поток влаги за счет градиента температур будет направлен к поверхности и уравнение (7.55) примет вид

$$q_m = q_{mi} + q_{mp} + q_{mt}$$

Расчет продолжительности сушки является наиболее важным параметром в инженерных расчетах и экспериментальных исследованиях. Решение теоретических уравнений тепло- и массообмена всегда сложно, а иногда и просто невозможно, поэтому получение приближенных, но достаточно надежных методик представляет значительный практический интерес.

Поскольку подвергают сушке чаще всего формованные изделия, основным вопросом в организации сушильного процесса является определение допустимой скорости сушки, которая не вызывает коробления или растрескивания изделий.

В наиболее общем виде критерий Кирпичева характеризует интенсивность внешнего влагообмена по сравнению с интенсивностью внутреннего влагообмена и имеет вид

$$Ki = q_m R / (a_m \rho_0 U_0), \quad (7.58)$$

где q_m — плотность потока влаги; R — характерный размер тела (для пластины — 0,5 ее толщины); a_m — коэффициент потенциалопроводности; ρ_0 — плотность сухого материала; U_0 — среднее начальное влагосодержание.

Тогда

$$q_m = Ki a_m \rho_0 U_0 / R. \quad (7.59)$$

С другой стороны, плотность потока влаги есть количество испаренной влаги $(U_0 - U_k)$ в единицу времени t с единицы поверхности $\rho_0 V/A$:

$$q_m = (U_0 - U_k) \rho_0 V / (tA), \quad (7.60)$$

где U_k — среднее конечное влагосодержание; V — объем материала; A — площадь испаряющей поверхности.

Решая относительно t выражения (7.59) и (7.60), получим

$$t = (U_0 - U_k) VR / (a_m U_0 Ki A). \quad (7.61)$$

Методика экспериментального определения величин, входящих в уравнение (7.61), приводится в специальной справочной литературе.

Приведенная методика расчета продолжительности сушки далеко не единственная и, строго говоря, не совсем корректна, поскольку

ку не учитывает напряженного состояния изделия от возникающего перепада давлений. В понятие режима сушки входит не только время процесса, но и параметры сушильного агента — температура, относительная влажность и скорость его перемещения. Эти величины влияют на интенсивность влагосъема с поверхности сушимого материала и, как правило, устанавливаются экспериментально.

Теоретические основы тепловлажностной обработки. Тепловлажностной (или гидротермальной) обработкой называют процесс одновременного воздействия на материал теплоты и влаги. В производстве строительных материалов тепловлажностной обработке как основной технологической операции подвергают бетонные изделия, силикатный кирпич, некоторые виды безобжиговых огнеупоров, композиции на основе полистирола и поливинилхлорида. Тепловая обработка минеральных строительных материалов ускоряет силикатное твердение составляющих, а полимерных материалов — вспенивание соответствующих композиций.

В качестве теплоносителей для тепловлажностной обработки применяют водяной пар, горячую воду и нагретый воздух с повышенной относительной влажностью. В последнем случае за счет выделения влаги из материала теплоноситель представляет паровоздушную смесь с большим или меньшим содержанием влаги. Тепловлажностная обработка может осуществляться при атмосферном давлении в камерах, формах, шнеках и при повышенном давлении в автоклавах и герметических формах.

Процесс обработки, как правило, делят на три периода: нагрев материала до температуры греющей среды, выдержка при максимальной температуре, охлаждение. Окончанием периода нагрева считают время, при котором поверхность материала нагреется до температуры теплоносителя. Второй период часто условно называют периодом изотермической выдержки. Условность названия связана с тем, что центральные слои материала в начале периода продолжают нагреваться, так как их температура отстает от температуры поверхности. Период охлаждения протекает без подачи теплоносителя в установку.

При тепловлажностной обработке полимерных материалов в горячей воде окончанием процесса является прекращение вспучивания материала.

Внешний и внутренний тепло- и массообмен может быть описан уравнениями, приведенными в гл. 5 и 6. Если при тепловлажностной обработке на поверхности материала не образуется пленки конденсата, что наблюдается при нагреве изделий горячим воздухом (например, обработка железобетонных изделий в щелевых камерах при обогреве ТЭНами), то балансовое уравнение описывается формулой

$$\alpha(t_r^\circ - t_{им}^\circ) = r\rho_0 R_v \frac{dU}{dt} + \lambda \nabla t^\circ + i_1 a_m \rho_0 \nabla U + \\ + i_2 a_m \delta \rho_0 \nabla t^\circ + i_3 a_p \nabla P.$$

В случае, если на поверхности материала образуется пленка сконденсировавшейся влаги, теплообмен между средой и материалом описывается формулой

$$\frac{\lambda}{\delta} (t_{ж}^* - t_{м}^*) = a_n r \frac{m_{п}}{RT} (P_{п}^i - P_{п}^*) + \alpha_{см} (t_{см}^* - t_{ж}^*).$$

Толщину пленки конденсата на вертикальной поверхности для любого расстояния от верха ее можно определить по выражению

$$\delta(x) = \sqrt{4\nu\lambda(t_{ж} - t_{ст})x / [g(\rho - \rho')r]}, \quad (7.62)$$

где ν — кинематическая вязкость жидкости; x — расстояние рассматриваемого сечения пленки от верхней кромки изделия; g — ускорение силы тяжести; ρ и ρ' — соответственно плотность конденсата и паровоздушной смеси.

При нагреве материала в горячей воде поток теплоты от жидкости к материалу можно определить по формуле Ньютона: $q = \alpha(t_{ж} - t_{м})$.

Процесс внутреннего тепло- и массообмена принципиально не отличается от рассмотренных в процессе сушки закономерностей и записывается в том же виде:

$$q = -\lambda \nabla t + i' q_m,$$

где $q_m = |q_{mi}| + |q_{mt}| + |q_{mp}|$.

Механизм тепло- и массопереноса при тепловлажностной обработке. Если при тепловлажностной обработке изделий греющей средой является пар или паровоздушная смесь с высокой относительной влажностью, а температура поверхности материала ниже температуры точки росы, то на поверхности изделия образуется пленка влаги. Для выяснения процессов, проходящих в материале, рассмотрим бесконечную пластину (аналогично рассмотренной в процессе сушки) и проанализируем направление составляющих потока массы q_m . Величина и направление составляющей потока q_{mi} при прочих равных условиях будет определяться временем, прошедшим с момента формования изделия до помещения его в тепловую установку. Если оно значительно, то в толще пластины за счет испарения влаги с поверхности успеет установиться параболический характер распределения влаги (рис. 7.37, а, пунктирная кривая). При внесении пластины в паровую среду на ее поверхности образуется пленка конденсата и влагосодержание поверхности $U_{п}$ станет больше влагосодержания центра $U_{ц}$. Через некоторый промежуток времени за счет диффузии влаги от поверхностных слоев к центру влагосодержание в пластине будет характеризоваться кривой, показанной на рис. 7.37, а сплошной линией. Промежуточные этапы отмечены штрихпунктирной линией.

Таким образом, в начале процесса пропарки влага движется от центра и от поверхности изделия к плоскости x , причем сама эта плоскость постепенно перемещается от поверхности к центру. Через некоторое время и до конца периода подъема температуры весь

поток влаги за счет ∇U будет двигаться от поверхности изделия к центру. Поток влаги за счет градиента температур q_{mt} в течение всего периода подогрева направлен от поверхности к центру, поскольку нагрев изделий идет снаружи.

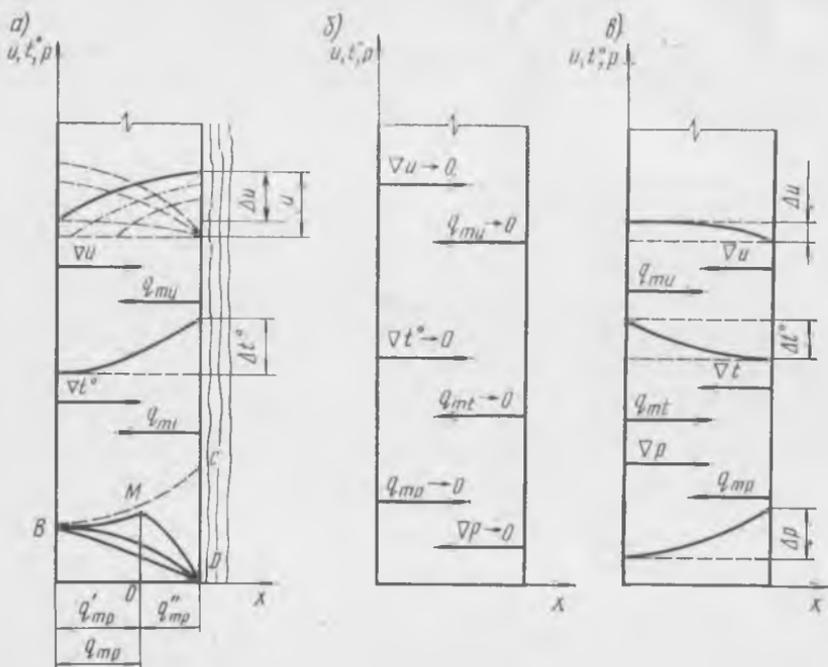


Рис. 7.37. К объяснению механизма тепло- и массопереноса при тепло-влажностной обработке при обогреве паром

При рассмотрении механизма тепло- и массообмена в процессах сушки было объяснено возникновение в материале градиента давлений, который максимален в центре пластины и уменьшается, превращаясь в нуль, на ее поверхности. При внесении материала в среду с повышенной температурой изменяется и характер давления по сечению пластины. В пузырьках воздуха, расположенных вблизи поверхности, температура возросла и, следовательно, снизилась относительная влажность. Тогда в пузырьке дополнительно испарилось некоторое количество влаги, которое увеличило давление в нем. В пузырьках, расположенных дальше от поверхности, температура изменилась меньше, поэтому и давление увеличилось на меньшую величину. Таким образом, кривая изменения давлений за счет температуры аналогична характеру температурной кривой и на рис. 7.37, а показана пунктиром.

Но давление на поверхности не может быть больше атмосферного. Поэтому реально в этот период могут наблюдаться два случая: 1) давление изменяется по кривой ВКД и тогда частный поток вла-

ги за счет градиента давлений q_{mp} направлен от центра к поверхности; 2) давление изменяется по кривой $ВД$ с максимумом в точке M , тогда частный поток влаги за счет градиента давлений разбивается на два потока: один направлен от центра к поверхности q'_{mp} и существует до плоскости OM , другой — от поверхности к центру q''_{mp} и существует тоже до плоскости OM .

Возможность существования того или иного случая определяется свойствами материала — пористостью, ее характером, теплопроводностью и условиями теплообмена. Поэтому суммарный поток влаги за счет градиента давлений в зависимости от условий может быть направлен как к центру, так и к поверхности. Тогда общий поток влаги q_m для большей части периода подогрева будет описываться выражением

$$q_m = -q_{mi} - q_{mt} \pm q_{mp} \quad (7.63)$$

В периоде изотермической выдержки (рис. 7.37, б) частный поток массы q_{mi} практически исчезает, так как влага к этому моменту заполняет все доступные поры и капилляры и влагосодержание по сечению материала выравнивается.

Температура поверхности в этот период постоянна, а температура центра изделия через некоторое время достигает температуры поверхности и ∇t исчезает. Давление внутри материала также приближается к давлению окружающей среды вследствие вытеснения воздуха влагой, заполняющей поры. Таким образом, в этот период внутренний тепло- и массообмен практически прекращается.

С началом охлаждения влага начинает испаряться с поверхности и ее температура становится равной температуре мокрого термометра. Градиенты влагосодержания и температуры по сравнению с первым периодом меняют знаки и частные потоки влаги за счет этих градиентов направлены от центра к поверхности (рис. 7.37, в). Последнее обстоятельство вызывает возникновение разрежения в центральных слоях и, следовательно, наличие градиента давлений, направленного от центра к поверхности. Частный поток влаги q_{mp} направлен от поверхности к центру и тормозит передвижение влаги к поверхности за счет градиентов температуры и влагосодержания.

Общий поток влаги q_m в этот период описывается выражением

$$q_m = q_{mi} + q_{mt} - q_{mp} \quad (7.64)$$

Механизм тепло- и массообмена при автоклавной обработке принципиально не отличается от описанного выше. Направление частных потоков влаги в отдельные периоды сохраняется таким же, но лишь со смещением в область повышенных давлений и с изменением абсолютных значений величин ΔU , Δt° и ΔP .

В период охлаждения при избыточном давлении интенсифицируется поток влаги из материала, что приводит к резкому охлаждению поверхности. Поэтому скорость сброса давления пара в автоклаве является основным фактором, определяющим перепад температур между поверхностью и центром материала.

Механизм тепло- и массообмена при тепловлажностной обработке в случае отсутствия пленки конденсата на поверхности материала принципиально не отличается от механизма, разобранный при сушке изделий. Знание этого механизма позволяет регулировать технологические параметры тепловой обработки таким образом, чтобы исключить возможность «пересушки» бетона, особенно его поверхностных слоев, и в то же время снизить общую влажность изделий. Так, при пропарке керамзитобетона в щелевых камерах, оборудованных ТЭНами, в течение всего периода тепловой обработки из бетона выделяется 50...70 кг влаги, что вполне безопасно, так как оставшейся воды с избытком хватает на гидратацию цемента. Конечная влажность бетона при этом составляет 10...13% против 18...20% при обогреве паром. А это значит, что такие панели в течение нескольких лет в процессе эксплуатации будут иметь большее термическое сопротивление, чем панели, прошедшие термическую обработку в камерах обогрева паром. Поэтому пониженная влажность стеновых панелей приводит к значительной экономии теплоты на отопление и улучшает санитарно-гигиенические условия жилья.

Рассмотрим теперь механизм тепло- и массообмена при обогреве материала горячей водой. Пусть неограниченная пластина помещена в емкость с циркулируемой водой (рис. 7.38). Из гл. 4 известно,

что на поверхности твердого тела имеется неподвижный пограничный слой. Тогда температура воды в емкости t_v будет выше температуры пограничного слоя t_n , который отдает часть своей теплоты материалу, а температура материала t_m ниже температуры этого слоя, т. е. будет выполняться неравенство

$$t_n > t_n > t_m. \quad (7.65)$$

В этом случае направление частных потоков влаги q_{mu} , q_{mt} и q_{mp} для всех трех периодов аналогично разобранным выше при обогреве материала паром.

В заключение необходимо отметить, что приведенные механизмы тепло- и массообмена (в том числе и при сушке материала) справедливы только для тепло- и теплоизолированной бесконечной пластины с двумя противоположными открытыми поверхностями.

Характер описанных процессов будет изменяться в зависимости от конфигурации обрабатываемого изделия (куб, тело вращения и т. д.), методов нагрева (всесторонний, двусторонний, односторон-

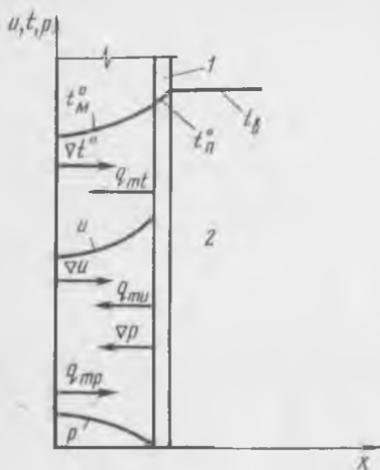


Рис. 7.38. К объяснению механизма тепло- и массообмена при обогреве горячей водой:

1 — пограничная пленка; 2 — водная среда

ний), расположения открытой поверхности (горизонтальное, вертикальное), конструкции формы и ряда других факторов, которые могут существенно изменить величину и направление соответствующих градиентов. Эти процессы специфичны не только для отдельных производств — керамики, бетона, пластмасс, но и технологических особенностей тепловой обработки одного и того же материала. Например, механизм тепло- и массообмена при тепловой обработке бетона в кассетах будет отличаться от механизма при обогреве бетона в термоформах.

Под режимами *тепловлажностной обработки* обычно подразумевают длительность отдельных периодов обработки, максимальную температуру обработки, а также параметры греющего теплоносителя — его температуру, относительную влажность и скорость перемещения относительно обрабатываемого материала. Для минеральных вяжущих материалов длительность периода изотермической выдержки и максимальная температура этого периода определяется требуемой степенью завершенности силикатного твердения вяжущего и допустимой температурой нагрева данного конкретного вяжущего.

Известно, например, что тепловая обработка, как правило, в той или иной степени снижает показатели физико-механических свойств бетона по сравнению с его твердением во влажных условиях при обычной температуре. Причем это снижение тем больше чем интенсивнее и жестче режимы тепловой обработки. Жесткость режимов прежде всего определяется интенсивностью роста и снижения температуры на первом и последнем этапе тепловлажностной обработки, которые вызывают возникновение в материале напряженного состояния. Определяющим условием возникновения в материале напряжений является тепло- и массоперенос.

Как показано ранее, возникновение градиентов температуры, влагосодержания и давления вызывает движение влаги в материале и, следовательно, различные по величине деформации усадки и набухания коллоидного капиллярно-пористого тела. Ни усадка, ни набухание сами по себе не вызывают напряженного состояния материала. Напряжения появляются за счет недопущенных деформаций.

На рис. 7.39, а показан характер возникающих недопущенных влажностных деформаций материала при обогреве его паром. Причины их возникновения см. выше.

Принципиальным отличием рассматриваемого процесса является смена знаков возникающих напряжений. В отличие от сушки при обогреве паром поверхностные слои испытывают напряжение сжатия, а центральные слои — растяжения. Аналогичная схема возникновения напряжений с теми же знаками может быть приведена и вследствие недопущенных температурных деформаций (рис. 7.39, б). Перепад давлений ΔP в материале также создает напряжения, которые стараются сдвинуть слои один относительно другого. Эпюра результирующих напряжений (от ΔU , Δt° и ΔP) может быть получена сложением частных эпюр.

Поскольку сам процесс тепло- и массопереноса в каждом конкретном случае зависит от величины и характера пористости, тепло- и массопроводности материала, формы и размеров изделия и множества других факторов, попытки ряда исследователей рассчитать режим пропаривания исходя из допустимой скорости нагрева

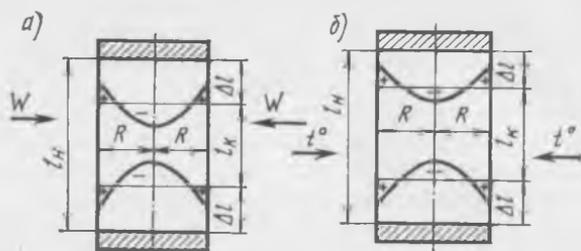


Рис. 7.39. Схема возникновения недопущенных влажностных и температурных деформаций при нагреве паром

(в первооснове — из величины возникающих напряжений) пока не увенчались успехом. Поэтому основным остается принцип экспериментального подбора режимов обработки по оценке физико-механических свойств полученных изделий. Однако ряд серьезных практических выводов качественного характера все-таки можно сделать, если хорошо представлять себе механизм процессов тепло- и массообмена. Например, ранее было показано, как формируется перепад давлений внутри материала и было отмечено, что он образуется за счет нахождения в материале газовой фазы. Поэтому если массу во время формирования подвергнуть вакуумированию, то количество воздуха в ней резко понизится. Совмещая этот процесс с одновременным предварительным разогревом смеси, можно значительно снизить возникающие на первой стадии тепловой обработки внутренние напряжения в материале. Следовательно, можно увеличить допустимую скорость нагрева изделия, сократив, тем самым, длительность общего цикла пропаривания.

Период изотермической выдержки с точки зрения нарушений в структуре материала является наиболее спокойным, поскольку ∇U , ∇t° и ∇P сначала уменьшаются, а затем практически исчезают.

Период охлаждения для материалов, набирающих прочность за счет гидратационного твердения, является самым ответственным. Если в первый период частичные нарушения структуры могут залечиваться вследствие углубления реакций гидратации, то в третий период этих залечиваний в большом объеме происходить не может. Поэтому технологу при разработке режимов необходимо достаточно серьезное внимание обратить на режим охлаждения изделий.

Обжиг. В производстве строительных материалов обжиг является распространенной технологической операцией. При обжиге в материале протекают сложные физико-химические процессы, приводящие к изменению химического и минералогического состава ис-

ходных материалов с существенным изменением свойств конечного продукта. Обжиг применяют для получения керамических материалов (кирпича, керамзита, огнеупоров), минеральных вяжущих веществ (цемента, извести, гипса), различного вида стекол. Технология обжига сырьевых смесей для получения вяжущих веществ и стекол специфична и рассматривается в соответствующих курсах. В настоящем разделе даются общие закономерности обжига керамических материалов при производстве стеновой, теплоизоляционной, отделочной, санитарно-технической и огнеупорной керамики.

Для перечисленных групп керамических изделий обжиг является завершающей стадией технологического процесса. Физические и химические процессы, протекающие при обжиге, определяют состав и характеристику образующихся фаз, их соотношение, размер, форму и взаимное расположение структурных элементов каркаса, изменение массы и объема керамического изделия. Таким образом, эти процессы обуславливают весь комплекс физико-технических свойств полученного материала. К ним относятся: термическое разложение исходных сырьевых материалов, химические реакции между компонентами и их модификационные превращения; окислительно-восстановительные процессы при взаимодействии с газовой средой обжига; процессы растворения в расплаве твердых фаз и их кристаллизация; изменение объема при спекании и образовании керамического черепка. Термин «спекание» до настоящего времени в технической литературе не имеет однозначного толкования. Считают, что в результате спекания сырец, подвергнутый термической обработке, превращается из конгломерата слабо-связанных частиц в единое твердое тело, которое может быть разрушено только при разрыве возникших прочных связей.

За основной признак спекания принимают повышение плотности и механической прочности материала при обжиге. Образование новых фаз, их соотношение и т. п. не являются общими признаками спекания, хотя почти всегда и сопровождают его. Чаще всего для количественной оценки процесса спекания принимают изменение плотности готового материала. Такая оценка спекания не универсальна, поскольку во многих случаях, особенно при производстве огнеупоров, изделия в процессе обжига приобретают значительную прочность и требуемые свойства без уплотнения, а иногда даже и при снижении плотности по сравнению с исходной.

Изменения при обжиге кажущейся плотности являются функцией изменений как массы, так и объема материала. В то же время кажущаяся плотность зависит от истинной плотности ρ_0 и общей пористости P . Тогда объемные изменения при обжиге (%)

$$\alpha_{об} = \left[\frac{\rho_2 - \rho_1(1 - a/100)}{\rho_2} \right] 100; \quad (7.66)$$

$$\alpha_{об} = \left[1 - \frac{\rho_{01}(1 - P_1/100)(1 - a/100)}{\rho_{02}(1 - P_2/100)} \right] 100, \quad (7.67)$$

где ρ_1 , ρ_2 и ρ_{01} , ρ_{02} — соответственно плотность и истинная плотность до и после обжига; a — процентное изменение массы мате-

риала при обжиге и в случае ее уменьшения обычно носит название потерь при прокаливании.

Величина $\alpha_{об}$ может иметь как положительное, так и отрицательное значение, что соответствует явлению объемного роста или усадке материала при обжиге. Последний случай наиболее распространен для керамических строительных материалов.

Связь между линейной и объемной усадкой (%) имеет вид

$$\alpha_{лин} = (\sqrt[3]{1 + \alpha_{об}/100} - 1) 100. \quad (7.68)$$

Для линейной усадки в пределах до 10...12% без существенной ошибки $\alpha_{лин}$ можно подсчитать по формуле

$$\alpha_{лин} \approx \alpha_{об}/3. \quad (7.69)$$

При отсутствии существенных изменений массы материала и его истинной плотности (т. е. $a \approx 0$ и $\rho_{01} \approx \rho_{02}$) кривые усадки при обжиге соответствуют кривым пористости и кажущейся плотности (рис. 7.40). На участке I, за исключением небольшого термического расширения, существенных изменений в материале не происходит. На участке II протекает процесс спекания, который усиливается с повышением температуры.

В этом интервале наблюдается существенная усадка с соответствующим увеличением плотности и снижением пористости с одновременным ее перераспределением. Часть открытых пор заплывает образующейся жидкой фазой, образуя закрытые поры. Участок III соответствует максимальным значениям усадки и плотности материала с весьма малыми значениями открытой пористости. В технической литературе этот участок часто называют интервалом спекания. Последний IV участок соответствует вспучиванию материала, т. е. уменьшению плотности главным образом за счет объема закрытых пор.

Рассмотренная диаграмма дает возможность определить области, в которых происходит обжиг того или иного

вида керамического материала. Температуры обжига для каждой конкретной исходной шихты будут различны, так же как и интервалы соответствующих областей. Однако начальный период участка II принципиально может быть использован для получения обычной стеновой керамики, средняя часть и конец этого участка — для плотной строительной керамики и огнеупоров (последние в зависимости от требований по плотности могут захватывать и участок III), участок IV — для получения вспученных материалов (керамзита, аглопорита).

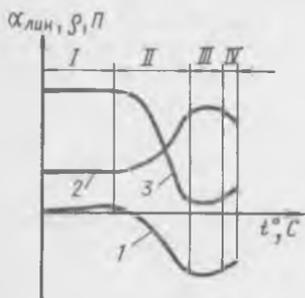


Рис. 7.40. Изменение характеристики материала в процессе обжига:

1 — линейная усадка; 2 — плотность; 3 — истинная пористость; 4 — участок до начала спекания; I — участок процесса спекания; II — интервал спекшегося состояния; IV — область пережога или вспучивания

Основным энергетическим источником процесса спекания является свободная поверхностная энергия частиц на границе раздела фаз кристалл — газ и жидкость — газ. При спекании уменьшаются межфазовые поверхности раздела и, следовательно, свободная энергия системы. Именно поэтому при тонком измельчении материалов (т. е. при значительной поверхностной энергии) спекание всегда интенсифицируется.

Если спекание происходит в системе твердая фаза — жидкость — газ, то основная роль в механизме массопереноса принадлежит жидкой фазе. Такие процессы называют жидкостным спеканием. Если спекание протекает без жидкой фазы, оно носит название твердофазового спекания.

Жидкостное спекание является наиболее распространенным в технологии керамики. В зависимости от скорости и продолжительности нагрева в изотермических условиях жидкая фаза приближается к равновесному состоянию с твердой фазой.

На рис. 7.41 показана схема контакта шаровых частиц с жидкой фазой. Наличие мениска на ее поверхности обуславливает возникновение сжимающего капиллярного усилия, стягивающего частицы. Стягивающая сила

$$F = \pi \sigma R \sin \varphi [R \sin \varphi (1/r_1 - 1/r_2) + 2 \sin (\varphi + \theta)], \quad (7.70)$$

где σ — поверхностное натяжение на границе жидкость — газ; R — радиус сферических частиц; φ — угол, зависящий от уровня жидкой фазы; r_1, r_2 — радиусы кривизны поверхности жидкости; θ — краевой угол смачивания.

Анализируя приведенную формулу, можно сказать, что максимальное значение стягивающей силы при данном содержании жидкой фазы будет при полном смачивании. Она резко уменьшается при увеличении θ , и при $\theta_{кр} < 90^\circ$ происходит отталкивание частиц. Вывод справедлив и при изменении количества жидкой фазы (т. е. при увеличении угла φ). При $\theta = \text{const}$ увеличение угла φ уменьшает значение F . При $\theta + \varphi/2 < 90^\circ$ — действует сжимающее усилие, при значениях этой суммы более 90° — частицы отталкиваются.

Увеличение радиуса частиц и поверхностного натяжения повышает стягивающее усилие. Увеличение количества жидкой фазы при полном смачивании уменьшает стягивающее усилие.

Проведенный анализ имеет важное значение для объяснения величины и характера огневой усадки, а следовательно, и плотности получаемого материала.

В самом деле, возникающее сжимающее усилие перемещает жидкость из зоны контакта и способствует сближению частиц, т. е. усадке материала. Скорость этого сближения, при прочих равных

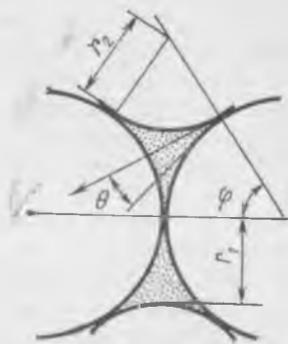


Рис. 7.41. Схема контакта сферических зерен с прослойкой жидкой фазы

условиях, повышается со снижением вязкости, т. е. способностью жидкой фазы быстрее вытекать из зоны контакта в поровое пространство. Поскольку с повышением температуры вязкость падает быстрее, чем поверхностное натяжение, увеличение температуры обжига ускоряет спекание.

В рассматриваемом случае усадка заканчивается при достижении непосредственного контакта между частицами. Расчеты, подтвержденные экспериментальными данными, показывают, что наибольшая плотность материала может быть достигнута при содержании расплава около 35...40%, т. е. равного пустотности смеси. Но и в этом случае пористость не снижается менее 5...8% вследствие заземления воздуха и практической невозможности его полного вытеснения образующейся жидкой фазой.

Однако, как показывают опыты, процесс сближения центров частиц при достижении их непосредственного контакта не заканчивается. На границе контакта происходит растворение твердой фазы и перехода ее в расплав. Известно, что растворимость мелких частиц выше, чем более крупных.

Процесс дробления при подготовке шихты избирательный — более мягкие зерна, имеющие один минералогический и химический состав при одном и том же усилии дробления получают более дисперсными, чем прочные зерна. Вследствие этого один и тот же расплав оказывается ненасыщенным по отношению к составу мелких частиц и насыщенным или перенасыщенным по отношению к составу более крупных частиц. Поэтому одновременно протекают два процесса: растворение твердой фазы в расплаве и ее кристаллизация из расплава. Последнее обстоятельство весьма важно, так как кристаллизация протекает на стенках пор, способствуя их зарастанию.

Таким образом, жидкостное спекание всегда характеризуется наличием расплава, который при охлаждении в большей или меньшей степени обуславливает наличие в материале стеклофазы. Последнее обстоятельство для некоторых видов керамики является неприемлемым, поскольку снижает огнеупорность, химическую стойкость и ряд других свойств.

Твердофазовое спекание происходит при практическом отсутствии расплава. Если незначительное количество жидкости и образуется за счет некоторых случайных примесей, то рассмотренный выше механизм спекания никак не может быть определяющим.

Следовательно, при твердофазовом спекании должны действовать какие-то другие механизмы переноса вещества непосредственно между твердыми частицами, вызывающие уплотнение массы. Такими процессами могут быть пластическая деформация твердых частиц, испарение вещества с его последующей конденсацией на поверхности пор, диффузия в твердом теле. Первые два процесса используют (довольно редко) в огнеупорной промышленности при спекании под давлением (пластическая деформация) и при высокотемпературном, выше 2200°C, обжиге («испарение — конденсация»).

Процессы твердофазового спекания, основанные на диффузионном механизме переноса вещества, являются наиболее распространенными. Возможность диффузии вещества в твердом теле обусловлена наличием дефектов кристаллической решетки. Главную роль в процессах диффузии играют вакансии, т. е. узлы кристаллической решетки, не заполненные соответствующими атомами (ионами). Атом или ион, перескакивающий благодаря тепловому движению с узла решетки на соседнюю вакантную позицию, освобождает тем самым новую вакансию, что создает возможность продолжения процесса.

Направление и интенсивность диффузионного перемещения вещества между отдельными участками кристалла зависит от существующей между ними разницы в концентрации вакансий. Поэтому для анализа и установления количественных закономерностей данного процесса его удобно рассматривать как «диффузию вакансий», направленную в сторону, противоположную диффузии вещества. Таким образом, вещество перемещается от участков, называемых «поглотителями» (или «стоками») вакансий, к участкам, где образуется наибольшее число новых вакансий.

В каждом кристаллическом веществе при данной температуре существует определенная равновесная концентрация вакансий, которая зависит от интенсивности теплового движения и, следовательно, растет с ростом температуры.

Процесс спекания начинается с некоторого первичного упрочнения порошков при нагревании, т. е. со срастания контактирующих частиц у точек их соприкосновения. Возможность первоначального срастания зависит от интенсивного теплового движения атомов. По мере повышения температуры все большее число атомов на поверхности одной частицы попадает в силовые поля другой, с ней соприкасающейся. Такие переходы являются началом образования перемычки между ними (рис. 7.42).

Вогнутая поверхность перемычки, растягиваемой силами поверхностного натяжения, становится участком повышенной концентрации вакансий, т. е. источником вакансий. Остальная, выпуклая часть поверхности, сжимаемая силами поверхностного натяжения, а также межкристаллическая граница на участке контакта являют-

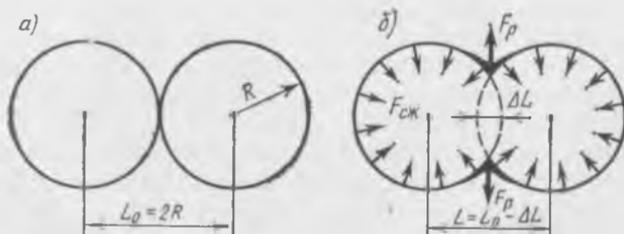


Рис. 7.42. Схема диффузионного спекания:

а — начальное положение; б — процесс спекания соответственно направлению сжимающих и растягивающих напряжений

ся поглотителями вакансий. Следовательно, объемный диффузионный поток атомов направляется на поверхность перешейка и расширяет его. Поскольку часть потока вещества, направленного к поверхности перешейка, выносится из области межчастичного контакта, частицы сближаются, расстояние между их центрами уменьшается, происходит усадка и уплотнение системы.

По мере заполнения объема пор системы веществом, нарастающим на перешейках, геометрический характер протекающего процесса меняется. Разрастающиеся перешейки начинают смыкаться, и на некоторой стадии спекания система сообщается (открытых) пор постепенно разделяется на замкнутые участки. На заключительной стадии спекания в материале присутствуют в основном уже закрытые изолированные поры. В период перехода к преимущественно замкнутой пористости, обычно начинающегося при величине общей пористости около 10%, процесс уплотнения замедляется, но не прекращается.

Возможность зарастания замкнутых пор также определяется диффузионным процессом. Вогнутая внутренняя поверхность изолированной поры становится под влиянием сил поверхностного натяжения источником повышенной концентрации вакансий. Процессы объемной диффузии вакансий с поверхности поры по направлению к границам кристалла (если пора находится внутри кристалла), а также поверхностной диффузии по границе кристаллов (если пора пересекает границу) означают поступление вещества в пору и уменьшают ее объем.

При определенных благоприятных условиях изолированная пора может зарости полностью. Однако зарастание таких пор практически лимитируется двумя главными факторами: увеличением давления газовой фазы в зарастающей поре, из которой газ не имеет выхода, и малой скоростью объемной диффузии вакансий к границе от внутренних пор, расположенных на значительном расстоянии.

Процесс диффузионного спекания можно интенсифицировать повышением степени дисперсности исходного материала, применением «активизированного» сырья, т. е. имеющего повышенную дефектность кристаллического строения, введением добавок, образующих твердые растворы с основным компонентом смеси.

Рассмотрим теперь поведение глин на участке IV (рис. 7.40). При получении плотных материалов этот участок находится за пределами оптимальных температур, поскольку происходит некоторое разрыхление материала, сопровождающееся снижением прочности. Однако это обстоятельство используется для получения поризованных керамических материалов — керамзита и аглопорита, используемых в качестве легкого заполнителя для бетонов и композитов на основе пластмасс.

Основным условием, обеспечивающим вспучивание глин при обжиге, является совмещение во времени способности обжигаемой глиняной массы к пластическим деформациям без нарушения

сплошности (так называемое *пиропластическое состояние*) с интенсивным газовыделением внутри нагреваемой массы.

Если применить рассмотренный выше процесс жидкостного спекания к отдельной глиняной грануле, то он сопровождается размягчением и уплотнением ее поверхности с одновременным уменьшением газопроницаемости поверхностного слоя. Если во время нагрева глины процесс активного газовыделения происходит раньше процесса спекания, то газы свободно проникают через поверхность гранулы и никакого вспучивания не будет.

Если температура нагрева такова, что вязкость пленок жидкой фазы незначительна, то газы, находящиеся в порах под избыточным давлением будут легко разрывать эти пленки и так же свободно выходить из гранулы. И только тогда, когда максимум интенсивности газовыделения совпадает с тем температурным интервалом, когда глина находится в пиропластическом состоянии (индивидуальное для каждой глины), условия для получения требуемого материала становятся оптимальными. Особенность влияния каждого из этих факторов на технические режимы подготовки глиняной массы и ее термической обработки изучаются в специальном курсе и здесь не рассматриваются.

Расчеты показывают, что коэффициент вспучивания глины $K_{всп}$ связан с вязкостью следующим соотношением:

$$K_{всп} = l^{0,9} P_{изб}^{t/(8\eta)}, \quad (7.71)$$

где $P_{изб}$ — избыточное давление газов, образовавшихся внутри пузырька; t — время изотермического расширения объема газа в пузырьке; η — вязкость.

Режимы обжига материала определяются как формой и размерами конкретных изделий, так и составами и свойствами масс, из которых они отформованы. Несмотря на все многообразие режимов теплообработки, можно выделить ряд общих положений, которыми руководствуются при назначении технологических параметров обработки.

Период нагрева изделий является весьма сложной стадией обжига. Основная опасность заключается в возможности разрушения изделий, которая вызывается, как правило, объемными изменениями при нагреве или интенсивными процессами массообмена. На отдельных этапах этого периода скорость нагрева должна быть лимитирована исходя из следующих соображений: 1) в интервале температур до 200...300°C происходит удаление остаточной влаги, которое не связано с объемными изменениями изделия, но при большой скорости нагрева может привести к взрывному разрушению вследствие резкого увеличения давления пара во внутренних областях обжигаемого материала; 2) быстрое удаление химически связанной влаги и других газообразных продуктов разложения части сырьевых компонентов (например, декарбонизация $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ и т. п.) могут привести к нарушениям внутренней структуры отформованного изделия; 3) возникновение напряженного состояния в материале (механизм тот же, что и при сушке) связано с различ-

ным термическим расширением поверхностных и глубинных слоев материала и ограничивает допустимую скорость подъема температуры. Максимально допустимый перепад температур $\Delta t_{\text{доп}}$, при превышении которого в изделии появляются трещины, зависит от коэффициента термического расширения, механической прочности в данный момент и модуля упругости. В процессе нагрева эти показатели материала изменяются, поэтому и $\Delta t_{\text{доп}}$ также меняется; 4) усадка при спекании вызывает возникновение внутренних напряжений в изделии с обратным по сравнению с предыдущим случаем знаком. Линейные усадки, составляющие для обычной керамики не менее 10%, намного превышают температурные расширения, поэтому объемные изменения изделия в период спекания значительно опаснее, чем температурные. Поэтому в период спекания необходимо замедлить, а в некоторых случаях и прекратить рост температуры до ее выравнивания по всему сечению изделия.

Конечная температура обжига и продолжительность выдержки при этой температуре определяется достижением требуемой степени спекания или необходимостью завершения химических реакций и фазовых превращений. Часто возможно варьирование соотношения температуры и длительности выдержки для достижения аналогичных результатов. Однако при этом незначительное понижение температуры обжига ведет к значительному увеличению времени его. Поэтому с технико-экономических позиций более рационален короткий обжиг при более высоких температурах.

Такая взаимозаменяемость параметров не является общим правилом. В тех случаях, когда изменение температуры существенно смещает фазовые равновесия и состав фаз, такая замена противопоказана.

Продолжительность и температуру обжига определяют не только физико-химические характеристики материала, но и форма и размер изделия. Поскольку продолжительность выравнивания температуры в теле материала пропорциональна квадрату его наименьшего размера, продолжительность выдержки массивных изделий приходится значительно увеличивать.

Период охлаждения для большинства керамических материалов не сопровождается существенными физико-химическими процессами. Поэтому напряжения, возникающие в изделии, связаны главным образом с термическим сжатием и с модификационными превращениями затвердевающей жидкой фазы. Последнее обстоятельство имеет особое значение для материалов с большим содержанием SiO_2 , поскольку его полиморфные превращения проходят с большими объемными изменениями. Все же для большинства материалов период охлаждения значительно короче длительности нагрева.

* * *

Тепловая обработка для подавляющего большинства строительных материалов является заключительным этапом в группе основных технологических переделов. Дефекты изделий, полученные на этой стадии технологической переработки часто не обратимы.

Последующие дополнительные операции связаны главным образом либо с соответствующей доводкой поверхности полученных изделий до требуемого уровня, либо с устранением тех дефектов, которые выявились (или появились) на стадии теплообработки.

Иногда полученное изделие является элементом последующей укрупнительной сборки (например, на некоторых ДСК плоские железобетонные элементы собираются в объемные блоки для укрупненного их монтажа на объектах строительства) или используется как составная часть какой-либо конструкции, в которой она выполняет определенную функцию (например, полиуретановый утеплитель в стеновых панелях типа «сендвич»). Все эти операции являются важными и входят в технологический процесс конкретного предприятия, но не в технологию создания материала.

§ 7.7. Принципы оптимизации технологических решений

При проектировании и организации любого технологического процесса инженерная мысль всегда была направлена на поиски таких решений, которые бы позволили достигнуть желаемого результата с наименьшими затратами труда. Экономисты, механики, технологи пытались из различных, имеющихся в их распоряжении вариантов, выбрать лучший, оптимальный. Еще два-три десятилетия назад в большинстве случаев при решении вопроса, какой вариант лучше, решающую роль играли опыт и инженерная интуиция проектировщика, технолога-эксплуатационника, экономиста. Объяснялось это большой сложностью технологических процессов, обилием и разнообразием взаимосвязей внутри каждого технологического передела, необходимостью количественной оценки этих взаимосвязей. Естественно, что сопоставить и оценить это колоссальное количество возможных вариантов реально было невозможно.

Кибернетика — наука об управлении сложными системами — получила широкое внедрение в проектирование, управление, экономические расчеты. Применение быстродействующей вычислительной техники привели к развитию нового научного направления — оптимизации технологических процессов. Современный подход к оптимизации характеризуется формализацией задачи, которая формулируется стандартным образом, после чего ее решение проводится на основе четкого однозначного рецепта — алгоритма. Однозначность в данном случае не означает отсутствие вариантов решений. Наоборот, проводится сравнение различных вариантов. Алгоритм при этом лишь точно определяет, как проводится такое сравнение.

Выбор оптимальных решений обычно производится в три этапа: 1) формулирование задачи; 2) нахождение оптимальных условий на основе алгоритма оптимизации; 3) реализация оптимальных условий на практике.

Формулировка задачи является важнейшим этапом решения задач по оптимизации. Если задач плохо сформулирована, то ее совершенно правильное решение может дать абсурдный практический результат. В технологических процессах на стадии формулирования

задачи обязательно должен участвовать специалист-технолог, поскольку необходимо учитывать общее развитие данной отрасли, физико-химические особенности процесса, его экономичность, сложившуюся конъюнктуру и множество других обстоятельств.

При постановке задачи оптимизации должна быть сформулирована и количественно охарактеризована оптимизируемая величина, которую называют *критерием оптимизации*. Этот критерий является главным признаком, по которому судят о хорошем функционировании всей системы или отдельного процесса. Критерий оптимизации должен удовлетворять трем основным требованиям: 1) быть единственным; 2) иметь количественное выражение; 3) изменяться монотонно при улучшении качества функционирования системы. Попробуем разобраться в этих требованиях.

Единственность — самое основное и, пожалуй, самое трудное требование в выборе критерия. Дело в том, что критерий оптимизации является одним из нескольких, а иногда и многих результатов процесса — его выходом. Но ведь на практике нас интересует не один, а несколько выходных параметров и мы хотим, чтобы если не по всем, то хотя бы по нескольким из них система была наилучшей. Часто даже в технической литературе можно встретить такую мысль: оптимальным является такое ведение технологического процесса, при котором производительность и качество продукта максимальны, а затраты и потери минимальны. При всей привлекательности такой формулировки задачи она абсурдна — так вести процесс невозможно. Известно, например, что прочность бетона естественного твердения при прочих равных условиях выше, чем пропаренного. Однако мы сознательно идем на допустимое снижение качества за счет резкого увеличения производительности.

При оптимизации производства в целом или его крупных подразделений наиболее обоснованы и хорошо работают *экономические критерии* — прибыль, рентабельность, себестоимость и др. Решение задач оптимизации по этим критериям тем сложнее, чем выше по иерархии (цех — завод — объединение — министерство) стоит данная система. Иногда использовать эти критерии затруднительно и на низких ступенях, так как на предприятии может не вестись учет работы по экономическим показателям, например, бригады, отдела, цеха. Чаще всего экономические критерии применяют на ступенях от завода и выше. Для упрощения задачи нередко пользуются *технологическими критериями* — производительностью, продолжительностью цикла, конкретными показателями качества продукта и т. д. По существу, за каждым технологическим критерием стоит тот или иной экономический показатель: чем выше производительность, тем больше прибыль, чем выше качество продукции, тем меньше будут затраты при ее эксплуатации и т. д.

Технологические критерии удобны при оптимизации на низших уровнях: отдельных стадиях технологического процесса, отдельного узла, аппарата и т. д., т. е. при *локальной оптимизации*.

Требование к критерию иметь количественное выражение объясняется необходимостью сопоставления различных вариантов. При

отсутствии числовой величины, оценки «лучше», «хуже» могут носить субъективный характер и сравнение вариантов становится крайне затруднительным. Иногда в выработке количественной оценки возникают определенные трудности. Например, как оценить эстетическое восприятие различных способов наружной отделки железобетонной панели? Если их 2...3, то понятие «красиво» и «некрасиво» еще может устроить. А если их 10...15, тогда как? В этом и подобных случаях прибегают к экспертной оценке в баллах, т. е. количественному сравнению.

Требование к монотонности изменения критерия также связано с необходимостью сравнительных выводов по ним. Важно иметь возможность оценивать объекты оптимизации по принципу: «чем больше (меньше) критерий, тем лучше». Так, при сравнении вариантов по экономическим критериям необходимо иметь однозначный вывод типа: «чем больше прибыль — тем лучше», или «чем меньше себестоимость — тем лучше». Нельзя в качестве критерия принимать показатель, обладающий некоторым оптимальным значением, от которого невозможно отклоняться. Если для какого-либо параметра, характеризующего систему, существует оптимальное значение, то он — не критерий оптимизации, а *оптимизирующий фактор*. Это те воздействия на систему, которые применяются для оптимизации системы, т. е. управляющие входы (см. гл. 2).

Количество оптимизирующих факторов при проектировании может быть значительно больше, чем на стадии непосредственного управления действующим производством. Вызвано это тем, что на стадии проекта изменение значений может осуществляться не в действительности, а на математической модели. Поэтому здесь можно найти оптимальные значения максимального числа факторов. На производстве число оптимизирующих факторов значительно меньше. Часть из них мы просто уже не можем изменить без серьезных затрат: размеры сушилки, систему подачи теплоносителя, систему подготовки сырья и т. п.

Даже при самом хорошем выборе критерия оптимизации, чаще всего его недостаточно для учета всех условий протекания процесса. С одной стороны, нас почти всегда интересует не один, а несколько результатов процесса, с другой — почти никогда не удастся реализовать все значения входных параметров на желаемом уровне. Поэтому условия, которые необходимо соблюдать независимо от их влияния на величину критерия оптимизации, называют *ограничениями*.

При оптимизации технологических процессов в технологии строительных материалов ограничения накладываются: 1) *по количеству и качеству сырья и готовой продукции*: качество конечного продукта ограничено соответствующими ГОСТами и не может быть произвольно изменено; объем продукции не может быть меньше планового; качественный состав сырья чаще всего определяется нормативными документами поставщика и редко может быть изменен непосредственно на данном предприятии; 2) *по технологическим условиям*: температура не может быть выше определенной

левой функции можно использовать средние значения некоторых величин, в том числе и случайных (так называемая стохастическая неопределенность). В этом случае задача отыскания оптимальной стратегии сводится к обычной задаче оптимизации, без каких-либо дополнительных гипотез.

Здесь речь идет об уравнении (см. гл. 2) $y_i = \varphi_i(\bar{X}, \bar{H}) + \psi_i(\bar{Z})$, где \bar{Z} — случайные значения, относящиеся к стохастической неопределенности. Методы их оценки достаточно хорошо разработаны и приводятся в специальной литературе, посвященной исследованию операций.

К сожалению, на практике такие задачи, где критерий оптимизации однозначно диктуется целевой направленностью операции, встречаются достаточно редко, преимущественно при рассмотрении небольших по масштабу мероприятий. Когда речь идет о сложных процессах, то их эффективность, как правило, не может быть полностью охарактеризована одним критерием — на помощь ему приходится привлекать дополнительные. Такие задачи называются *многокритериальными*.

Рассмотрим пример такой задачи. Допустим намечается реконструкция завода железобетонных изделий. Под углом зрения какого критерия надо выбирать решение, что оптимизировать? С одной стороны, хотелось бы обратить в максимум валовой объем продукции. Желательно также получить максимальный чистый доход, при этом себестоимость хотелось бы иметь минимальную при максимальной производительности труда. Короче, вернулись к задаче, изложенной выше: добиться максимума производства при минимуме затрат. Строгого научного смысла ни эта фраза, ни приведенная задача не имеют, ибо минимум затрат — нуль, а с отсутствием затрат произвести какую-либо полезную работу нельзя. Но несмотря на кажущуюся бессмысленность, эта задача правильно отражает тенденции, существующие при принятии решений в подобных ситуациях. Оптимизация задач, имеющих так называемую *неопределенность целей*, требует привлечения дополнительных гипотез. И хотя математика не может дать однозначного ответа в многокритериальных задачах, она может помочь принять *компромиссное решение*.

В настоящее время полноценной научной теории компромисса не существует. Так или иначе, при любом способе постановки задач обоснование решения по нескольким показателям остается не до конца формализованным и окончательный выбор решения всегда определяется волевым актом. Однако имеется ряд наиболее употребимых способов преодоления неопределенности целей, с которыми необходимо ознакомиться несколько подробнее и которые позволяют достаточно обоснованно подойти к выбору такого решения.

Для простоты математической записи положим, что внешние воздействия на систему состоят только из контролируемых и регулируемых факторов \bar{H} . Обсудим наиболее распространенный случай, когда перед исследователем стоит задача выбора способа

действия (вектора \bar{H}), обеспечивающего максимальное значение функциям $f_1(\bar{H}), f_2(\bar{H}), \dots, f_n(\bar{H})$ одновременно.

Принцип линейной свертки заключается в том, что вместо n частных критериев f_i предлагается рассматривать один критерий вида

$$F(\bar{H}) = \sum_{i=1}^n C_i f_i(\bar{H}), \quad (7.74)$$

где C_i — некоторые положительные числа, тем или иным способом нормированные. Нормирование коэффициентов C_i , как правило, осуществляется экспертами, которые и отражают представление оперирующей стороны о содержании компромисса, который она вынуждена принять.

По существу, этот способ заключается во введении отношения эквивалентности различных критериев (целевых функций), так как величины C_i показывают, насколько изменяется целевая функция $F(\bar{H})$ при изменении критерия $f_i(\bar{H})$ на единицу:

$$C_i = \partial F / \partial f_i.$$

Способ достаточно прост, но имеет свои «подводные камни», которые заключаются в том, что весовые коэффициенты C_i могут быть не постоянны, а меняться в зависимости от ситуации.

Критерий (7.74) обладает важным достоинством. Предположим, что ограничения, наложенные на выбор компонент вектора \bar{H} , являются линейными (ограничения первого типа)

$$\sum d_s^i \bar{H}^s \leq b_j, \quad (7.75)$$

так же как и функции $f_i(\bar{H}) = \sum d_s^i \bar{H}^s$. Тогда, очевидно, задача выбора с использованием критерия (7.74) сведется к задаче линейного программирования: определить максимум линейной функции $F(\bar{H}) = \sum_s \sum_i C_i d_s^i x_s$ при линейных ограничениях (7.75).

Принцип контрольных показателей основан на наличии во многих задачах системы нормативов $f_1^*, f_2^*, f_3^*, \dots, f_n^*$. Это означает, что параметры будущего, например, материала должны быть таковы, чтобы максимизировать функции $f_i(\bar{H})$ при условиях $f_i(\bar{H}) \geq f_i^*$, где $i=1, 2, \dots, n$ (ограничения второго типа). Тогда целевую функцию удобно представить в виде

$$F(\bar{H}) = \min_i [f_i(\bar{H}) / f_i^*] \quad (7.76)$$

и искать вектор \bar{H} , который обеспечивает максимальное значение $F(\bar{H})$.

Критерий (7.76) при наличии ограничений второго типа обладает тем же свойством, что и критерий (7.74), что легко показать, используя новую переменную

$$V = \min_i [f_i(\bar{H}) / f_i^*],$$

тогда к ограничениям (7.75) добавятся еще и такие:

$$f_i(\bar{H}) \geq V f_i^*, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (7.77)$$

и задача линейного программирования будет заключаться в определении максимума по \bar{H} скаляра V , удовлетворяющего ограничениям (7.75) и (7.77).

Этот способ перехода к однокритериальной задаче требует осторожности, так как основан на неявном допущении, что недостаток в одном показателе всегда может быть сбалансирован за счет другого.

Выделение главного критерия основано на том, что из всех имеющихся критериев выделяют главный, допустим $f_i(H)$, и стремятся его максимизировать (минимизировать), а на все остальные накладывают ограничения типа контрольных показателей.

Схема подобной редукции к однокритериальной задаче является самой простой, наиболее часто применяемой в инженерной практике. Задача исследователя сводится к обоснованному назначению допустимых границ ограничений.

Рассмотренные выше способы основаны на операции свертывания критериев, т. е. превращения многокритериальных задач к обычным задачам с одним критерием, методы решения которых хорошо разработаны. Смысл этих способов достаточно очевиден — одну задачу мы заменяли другой, причем в доказательстве правомочности такой замены и состоит содержание этой работы.

Подобные замены должны носить неформальный характер, поскольку они не могут быть получены как результат решения какой-либо математической задачи и выполняться обязательно при участии специалиста в данной области.

Иной подход к анализу многокритериальных задач был предложен итальянским экономистом В. Парето в 1904 г. Способ основан на исключении из неформального анализа тех вариантов решений, которые будут заведомо неудачными. Способ называют *компромиссами Парето*. Это делается следующим образом. Пусть имеется многокритериальная задача с n критериями $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$. Для простоты предположим, что все эти величины желательно максимизировать. Пусть в составе множества возможных решений есть два таких решения x_1 и x_2 , что все критерии $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$ для первого решения больше или равны соответствующим критериям для второго решения, причем хотя бы один из них действительно больше.

Тогда в составе множества \bar{X} нет смысла сохранять решение x_2 — оно вытесняется (доминируется) решением x_1 . Выбрасывая решение x_2 как неконкурентоспособное, переходят к сравнению других решений по всем критериям. В результате операции отбрасывания заведомо непригодных решений множество \bar{X} обычно сильно уменьшается: в нем сохраняются только так называемые эффек-

тивные (паретовские) решения, характерные тем, что ни для одного из них не существует доминирующего решения.

Поясним это примером. Пусть завод ЖБИ выпускает продукцию, качество которой нужно максимизировать по двум показателям — прочности R и морозостойкости $R_{Мрз}$. Эти показатели можно улучшить разными способами: увеличением прочности и изменением зернового состава заполнителей, увеличением расхода и марки цемента, снижением В/Ц, улучшением уплотнения бетона, изменением режима теплообработки, т. е. целым рядом мероприятий, которые составляют множество X , состоящее из конечного числа n возможных решений x_1 (например, В/Ц), x_2 (активность цемента), ..., x_n (температура теплообработки). Каждому решению соответствуют определенные значения показателей R и $R_{Мрз}$.

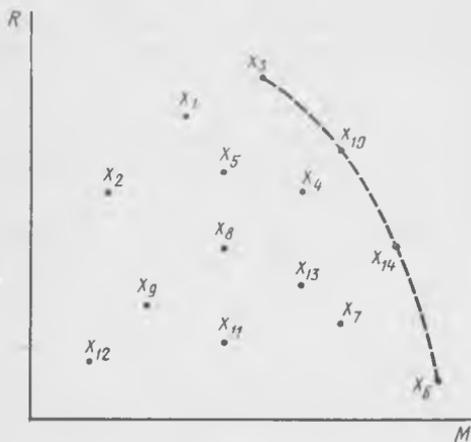


Рис. 7.43. Компромиссы Парето:

x_1, \dots, x_{14} — частные решения; $x_3; x_6; x_{10}; x_{14}$ — эффективные решения

Построим график (рис. 7.43), осями координат которого являются принятые критерии, а каждое решение — точка на этом графике. Этих решений будет 14. Тогда из всего множества x эффективными будут только решения $x_3; x_6; x_{10}; x_{14}$, лежащие на правой верхней границе области возможных решений. Для всякого другого решения существует хотя бы одно доминирующее, для которого либо R , либо $R_{Мрз}$, либо оба больше, чем для данного. И только для решений, лежащих на пунктирной линии, доминирующих не существует. Когда из многих решений выделены эффективные,

окончательный выбор нужно делать уже в пределах этого эффективного множества. По рисунку его образуют четыре решения: $x_3; x_6; x_{10}; x_{14}$. Из них x_3 — наилучшее по критерию R , x_6 — по критерию $R_{Мрз}$. Множество эффективных решений легче анализируется, чем множество X . Если нет дополнительной информации (нормативные ограничения, экспертные оценки и т. д.), окончательный выбор решения по-прежнему остается прерогативой специалиста-технолога. Только человек, с его непревзойденным умением решать неформальные задачи, принимать так называемые компромиссные решения (не строго оптимальные, но приемлемые по ряду критериев) может взять на себя ответственность за окончательный выбор.

Попробуем разобрать стратегию решения более сложной задачи. Допустим, требуется разработать состав теплоизоляционного

композиционного материала с искусственным органическим наполнителем на полимерном связующем при минимально возможных расходах связки. Поскольку строительный материал можно рассматривать как систему (см. гл. 2), для ее оптимизации нужно исходить из принципов, изложенных выше. На первый взгляд, задача кажется достаточно простой, хотя уже и на начальном этапе возникают сомнения в выборе критерия оптимизации. Сколько их? Если два, то строгого оптимального решения, как для большинства многокритериальных задач может не существовать. А если один, то что принять за основу — минимальный расход связки или коэффициент теплопроводности? Оба они удовлетворяют требованиям, предъявляемым к критериям в однокритериальных задачах: будут единственными, имеют количественное выражение, монотонно изменяются. Однако по условию задачи материал является теплоизоляционным, следовательно, по своему функциональному назначению определяющим свойством его будет являться теплопроводность.

Исходя из этого, критерием оптимизации следует выбрать коэффициент теплопроводности. Тогда входными (оптимизирующими) параметрами будут наполнитель и полимерное связующее, причем на последний наложено ограничение по минимально возможному его расходу.

Принципиально для создания однородного материала связующее достаточно ввести только в зону контакта частиц наполнителя. Поскольку технически это невозможно, в композиционных материалах всю поверхность наполнителя покрывают связкой. При этом расход связующего определяется суммарной поверхностью наполнителя и толщиной полимерной пленки δ . Минимальную поверхность имеет шар и, следовательно, наполнитель исходя из наложенного условия задачи ограничения должен иметь сферическую поверхность. Обычно в высокоэффективных теплоизоляционных материалах пустоты между наполнителем заполнены вспененным связующим. Исследованиями композиционных пенопластов установлено, что на поверхности наполнителя имеется слой невспененной или лишь частично вспененной связки, толщина которого зависит от природы как наполнителя, так и связки и пластично-вязких свойств последней. При прочих равных условиях наименьший расход связующего будет при непосредственном контактировании сфер (рис. 7.44).

Расход сырья на 1 м^3 материала складывается из расхода наполнителя ($m_з$), связующего на создание пленки ($m_{пл}$) и поризованной части межгранульного пространства ($m_{мг}$). Тогда плотность композиционного материала

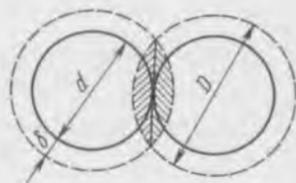


Рис. 7.44. К расчету уменьшения расхода связующего в контактной зоне

$$\rho_m = m_з + m_{пл} + m_{мг} \quad (7.78)$$

Для крупнопористого материала при отсутствии вспененной связки в пустотах между зернами заполнителя

$$\rho_{\text{кпм}} = m_z + m_{\text{пл}}. \quad (7.79)$$

Для дальнейших рассуждений воспользуемся материалом § 7.2 по плотнейшим шаровым упаковкам. Зная истинную плотность пленки связующего ($\rho_{\text{св}}$) и количество контактов с соседними шарами (K) для различных типов укладок, можно подсчитать расход связки на 1 м^3 материала для покрытия поверхности всех шаров

$$m_{\text{пл}} = \rho_{\text{св}} \left[\frac{1}{6} \pi (D^3 - d^3) - K \frac{1}{3} \pi \delta^2 \left(3 \frac{d + 2\delta}{2} - \delta \right) \right] \frac{V_z}{1/6 (\pi d^3)},$$

где первый член в квадратных скобках — полный объем пленки на сфере, второй член — объем K шаровых сегментов, получающихся за счет уменьшения объема пленки в зоне контактов сфер, последний множитель — количество сфер в 1 м^3 материала, V_z — объем заполнителя в 1 м^3 материала, зависящий от типа укладки.

Подставляя вместо D его значения $d + 2\delta$ (рис. 7.44) и преобразуя выражение в круглых скобках, получим общую формулу для расчета расхода связки на создание пленки на поверхности сферического заполнителя

$$m_{\text{пл}} = \rho_{\text{св}} V_z / d^3 [6d^2\delta + 12d\delta^2 + 8\delta^3 - K(3d\delta^2 + 4\delta^3)]. \quad (7.80)$$

После подстановки соответствующих значений K и V_z (см. табл. 7.1) для различных типов укладок получим:

кубическая

$$m_{\text{пл}} = 1,04 \rho_{\text{св}} \delta / d^3 (3d^2 - 3d\delta - 8\delta^2); \quad (7.81)$$

простая шахматная

$$m_{\text{пл}} = 1,2 \rho_{\text{св}} \delta / d^3 (3d^2 - 6d\delta - 12\delta^2); \quad (7.82)$$

двойная шахматная

$$m_{\text{пл}} = 1,4 \rho_{\text{св}} \delta / d^3 (3d^2 - 9d\delta - 16\delta^2); \quad (7.83)$$

пирамидальная и тетрагональная

$$m_{\text{пл}} = 1,48 \rho_{\text{св}} \delta / d^3 (3d^2 - 12d\delta - 20\delta^2). \quad (7.84)$$

Что же получилось? Из формул (7.80 ... 7.84) следует, что $m_{\text{пл}} = f(\rho_{\text{св}}, d, \delta)$, а ведь этих параметров нет в первоначальных условиях задачи. Вспомним ранее высказанное соображение о четкости и полноте в формулировке задачи. Следовательно, уже на этом этапе условие задачи надо дополнить пределами возможных изменений плотности связующего, толщины пленки и диаметра сфер.

Анализируя имеющиеся в технической литературе данные, можно прийти к выводу, что истинная плотность наиболее распространенных связующих находится в пределах $0,9 \dots 1,3 \text{ г/см}^3$, а толщина невспененной пленки составляет $0,002 \dots 0,01 \text{ см}$. Диаметр заполнителя можно принять в пределах $0,2 \dots 4 \text{ см}$. Для принятых

значений d и δ формулы 7.81 ... 7.84 можно упростить, откинув два последних члена в скобках как малозначимые. При этом максимальная ошибка в выражении 7.84 составляет 4,3%, что в инженерных расчетах вполне допустимо. Тогда в окончательном виде формулу (7.80) можно записать

$$m_{н.л} = 6V_3 \rho_{св} \delta / d. \quad (7.85)$$

Известен характер зависимости коэффициента теплопроводности от общей пористости (Π , %) для таких материалов, у которых конвективная составляющая незначительна и может не учитываться в общей передаче теплоты.

Общая пористость в 1 м^3 материала может быть подсчитана по формуле

$$\Pi = 1 - m_3 / \rho_3 - m_{св} / \rho_{св}. \quad (7.86)$$

где ρ_3 — истинная плотность заполнителя — еще один необходимый для расчетов входной параметр, отсутствующий в условии задачи.

Исследованиями ряда авторов установлено, что конвекция практически отсутствует при размерах воздушных прослоек менее 5 ... 7 мм.

Для пирамидальной укладки, например, максимальный размер воздушной ячейки между частицами $l_{\max} = \sqrt{3}/2 (d + 2\delta)$, тогда для отсутствия конвективной составляющей должно соблюдаться условие $(d + 2\delta) \sqrt{3}/2 < 5$, откуда для средних значений δ диаметр заполнителя должен быть менее 7 мм.

По формулам (7.78), (7.81 ... 7.84), (7.60) подстановкой различных $\rho_{св}$, ρ_3 , d и δ для всех типов упаковок на ЭВМ получены значения общей пористости материала (%). В качестве примера (рис. 7.45) приведена номограмма, построенная по результатам этих расчетов для пирамидальной и тетрагональной упаковок сферического заполнителя, при $\rho_{св} = \rho_3 = 1 \text{ г/см}^3$. Для других значений плотности необходимо ввести соответствующие поправки. Кроме того, приняты два допущения: толщина пленки не зависит от диаметра сферы и связующее в процессе отверждения не претерпевает усадки*.

Для пользования номограммой необходимо знать плотность гранул заполнителя, его диаметр и толщину пленки связующего. Например, имея заполнитель диаметром 4 мм при толщине пленки 0,06 мм и $\rho_3 = 110 \text{ кг/м}^3$ можно получить крупнопористый материал плотностью около 140 кг/м^3 и теплопроводностью $0,053 \text{ Вт/м}^2$. При

* При более точных подсчетах необходимо учитывать усадку связующего. В этом случае формула (7.86) будет иметь вид $\Pi = 1 - m_3 / \rho_3 - m_{св} / [\rho_{св} (1 + \Delta)]$, где Δ — объемная усадка в долях единицы.

Данных о зависимости толщины пленки от диаметра наполнителя в технической литературе не имеется. Такая зависимость вообще возможна, так как величина краевого угла смачивания зависит от радиуса кривизны поверхности, поэтому принятое допущение требует дополнительной проверки.

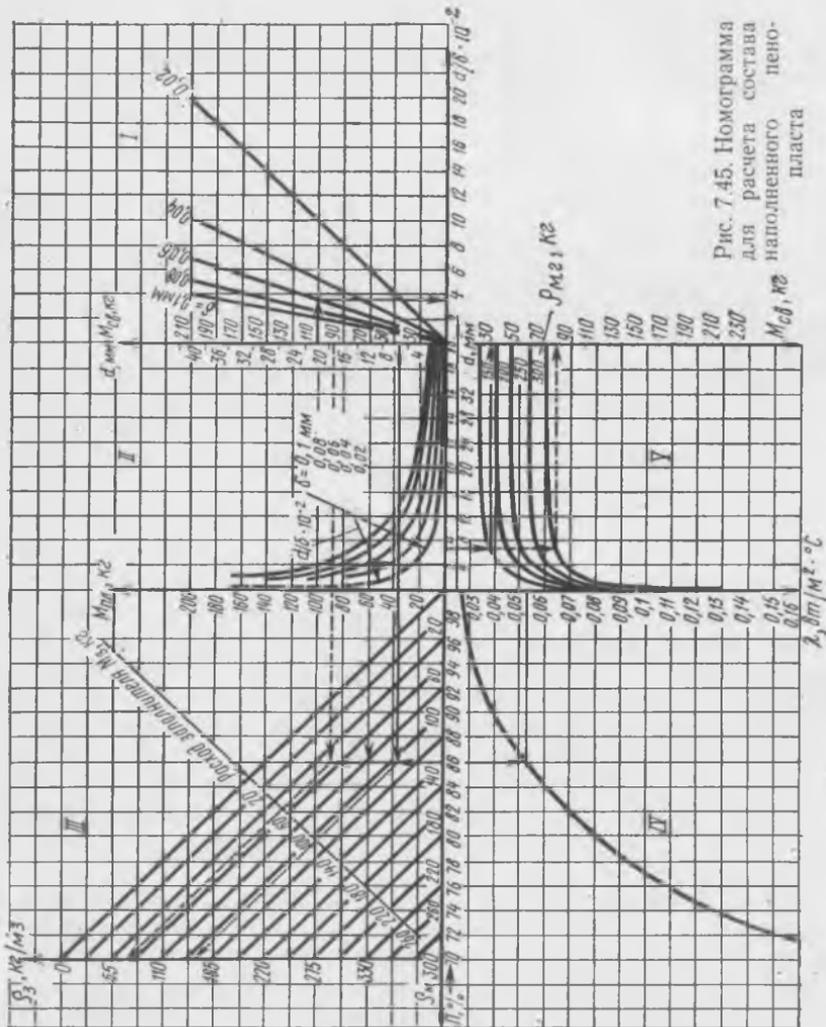


Рис. 7.45. Номограмма для расчета состава наполненного пенопласта

этом расход компонентов на 1 м^3 материала будет: заполнителя 80 кг и связующего 60 кг.

Для получения пенопласта с такими же теплофизическими свойствами при $d=20$ мм плотность гранул должна быть другой. Для этого по графику 1 предварительно определяют d/δ . Затем по графику 5 при выбранной плотности вспененной связки межгранульного пространства (допустим, $\rho_{\text{мг}}=100 \text{ кг/м}^3$) находят суммарный расход связки $m_{\text{св}}$, по которому плотность гранул должна составлять около 145 кг/м^3 (график 3). Зная стоимость заполнителя и связующего (во втором случае надо дополнительно учесть стоимость вспенивающего агента), можно определить стоимость затрат на сырьевые материалы и в соответствии с этим выбрать более дешевый материал. Плотность заполнителя, расход связующего (и, следовательно, стоимость сырья) может значительно измениться, если будет изменена плотность пенопласта в межгранульном пространстве. Так, при $\rho_{\text{мг}}=300 \text{ кг/м}^3$ расход связки увеличится до 88 кг, а для получения материала с тем же λ потребуется заполнить с плотностью гранул около 85 кг/м^3 .

Итак, задачу можно считать решенной для идеального случая, в частности для пирамидальной и тетрагональной упаковок сфер. Из этого можно сделать следующие практические выводы: 1) установлена методика (алгоритм) решения; 2) выявлены дополнительные параметры, которых нет в первоначальном условии и без которых конкретно ее решение невозможно; 3) выявлена необходимость уточнения некоторых зависимостей, которые приняты как допущения, но без знания их получить ответ, имеющий практический выход, затруднительно. В инженерных исследованиях последнее обстоятельство немаловажно, так как позволяет наметить направление исследовательских работ, имеющих практическое значение.

Например, теоретически толщина пленки может зависеть от диаметра сферы. Насколько эта зависимость при реальных изменениях радиусов кривизны заполнителя будет влиять на конечный результат, можно выяснить только специально поставленным экспериментом. Еще один пример. При расчете расхода связки ($m_{\text{св}}$) по номограмме мы считали плотность вспененного связующего заранее заданной (100 и 300 кг/м^3). А из чего исходить при выборе $\rho_{\text{мг}}$ в реальных материалах? Известно, что прочность материала есть функция его плотности. Но ведь о прочности разговора вообще не было, да и вид функции $R=f(\rho)$ для различных материалов различен и не для всех он известен. И, наконец, последнее. Мы приняли, что целевая функция $\lambda=\varphi(\Pi)$ дана в явном виде. Но многие исследователи считают, что косвенный контроль теплопроводности, особенно для крупнопористого материала, по его плотности (или, что одно и то же, по его общей пористости) ненадежен. Необходимо исходить из фактической структуры материала, крупности заполнителя, толщины связующей пленки, фактического размера пор и ряда других факторов.

Высказанные соображения вовсе не отрицают возможности построения графиков, подобных приведенной номограмме, связываю-

щих различные показатели исходных компонентов со свойством готового продукта. Они лишь подчеркивают необходимость последующего уточнения свойств готового материала экспериментом.

В реальных композиционных материалах рассмотренные типы упаковок практически не реализуемы. Связано это прежде всего с полидисперсностью заполнителя. Приведенную выше методику расчета можно было бы использовать, если бы была известна суммарная удельная поверхность заполнителя. Однако в настоящее время нет достаточно простых и надежных методов, которые возможно было бы применять в производственных условиях для ее определения. Расчет же удельной поверхности по $d_{ср}$, даже при одинаковых минимальных и максимальных значениях диаметров, дает ошибку, доходящую до 20% и выше, что неизменно приведет к ошибкам в вычислениях $m_{св}$. Кроме того, принятое ранее условие непосредственного контактирования зерен заполнителя в реальных условиях маловероятно. При любом способе введения связующего (пролив, окунание, совместное перемешивание) между гранулами заполнителя будет существовать слой связки, который необходимо учитывать.

Как же в этом случае подходить к оптимизации состава? Обычно, при реальном проектировании состава в задании указывают требуемую плотность композита, подразумевая наличие в явном виде целевой функции $\lambda = \varphi(\Pi)$, при минимально необходимой прочности материала. Плотность композита может быть подсчитана по формуле (7.78) и тогда определение расхода компонентов будет заключаться в нахождении значений m_3 , $m_{пл}$, $m_{мг}$.

Расход связующего на создание пленки может быть подсчитан по несколько видоизмененной формуле (7.80). Дело в том, что при полидисперсном заполнителе подстановка в формулу $d_{ср}$ в качестве расчетного диаметра приведет к указанной выше значительной ошибке. Она может быть сведена к минимуму, если подсчитывать расход связующего как сумму расходов по отдельным фракциям, и будет тем ниже, чем меньше интервал каждой фракции. При этом за расчетный диаметр принимается средний диаметр фракции узкого класса. Так как данные рассева чаще всего бывают представлены в виде частных остатков по массе, то общий объем наполнителя в материале можно подсчитать по формуле

$$V_3 = m_3 / \rho_3. \quad (7.87)$$

При отсутствии непосредственных контактов заполнителя возможны два случая: 1) заполнитель «плавающий», т. е. расстояние между центрами сфер $l > d + 2\delta$, и тогда объем пленки равен

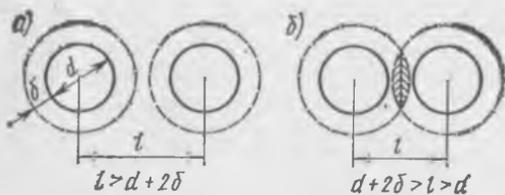


Рис. 7.46. Схема «бесконтактного» расположения заполнителя в материале:

а — «плавающий» заполнитель; б — заполнитель, контактирующий через пленку

сумме объемов шаровых колец (рис. 7.46, а); 2) уменьшение объема пленок за счет их пересечения будет определяться условием $d + 2\delta > l > d$ и значением K — количеством контактируемых пленок. Исследования показали, что при полидисперсном наполнителе число контактов составляет около 8. Приняв эту цифру за расчетную, формула (7.80) примет вид

$$m_{пл} = \sum m_{пл}^{фр} = \left(\rho_{св} \sum m_3 N_n / \rho_3 \right) \times \left(6d_n^2 \delta + 12d_n \delta^2 + 8\delta^3 - 8\pi \int_a^b y^2 dx \right), \quad (7.88)$$

где N_n и d_n — соответственно частные остатки (в долях единицы) и средний диаметр отдельных фракций. При «плавающем» наполнителе в формуле (7.88) последний член (объем тела вращения, образуемого пересекающимися пленками) в квадратных скобках отсутствует.

Упрощенная формула типа (7.85) в этом случае имеет вид

$$m_{пл} = \sum m_{пл}^{фр} = 6\rho_{св} \delta \sum m_3 N_n / (d_n \rho_3). \quad (7.89)$$

Принимая различные значения для V_3 и зная ρ_m , по формулам (7.78), (7.87) и (7.89) подсчитывают $m_{мг}$. Построив номограмму по типу, приведенному на рис. 7.45, можно провести сравнение различных вариантов состава материала.

Сложнее обстоит дело с прогнозированием прочности композита. Принципиально разрушение композиционного материала может происходить по четырем схемам (рис. 7.47): 1) матрице (связующему); 2) наполнителю и матрице; 3) матрице и поверхностному слою зерна; 4) матрице, поверхностному слою зерна и наполнителю (сложное разрушение).

Для первого случая определен принципиальный подход к решению задачи для регулярных укладок шаров одного диаметра.

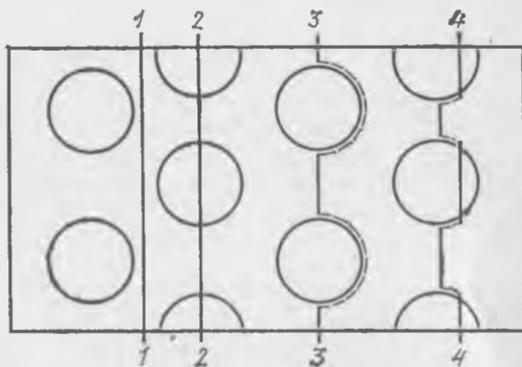


Рис. 7.47. Возможные схемы разрушения: 1—1 — по матрице; 2—2 — по наполнителю и связке; 3—3 — по контактной зоне наполнителя и связке; 4—4 — сложное разрушение

Например, количество контактов для тетрагональной укладки

$$K = (2n - 1)m + (m - 1)n, \quad (7.90)$$

где n — количество рядов в горизонтальной плоскости; m — то же, в вертикальной.

В 1 м^3 материала при этом типе укладки $n = 2 \cdot 100 / (d\sqrt{3})$ и $m = 100\sqrt{3} / (d\sqrt{2})$, где d — диаметр сферы, см. Суммарная площадь контактов при непосредственном соприкосновении шаров

$$A_{\text{общ}} = AK = \pi r^2 K = \pi \delta (d + \delta) [(2n - 1)(m + (m - 1)n)].$$

В этом случае $R = f(A_{\text{общ}})$ и при увеличении $A_{\text{общ}}$ прочность возрастает, однако вид функции пока не установлен.

Второй, третий и четвертый случаи являются достаточно сложными задачами строительной механики.

Качественные выводы по зависимости $R = \psi(R_m, R_a, R_3)$ можно получить, если рассмотреть разрушение элементарной ячейки материала с ребром a под действием, например, растягивающей силы F .

Примем следующие допущения: 1) разрушение элементарной ячейки произойдет при превышении напряжений, возникающих за счет приложения силы F , предела прочности на растяжение матрицы (R_m), или заполнителя (R_3), или контактной зоны (R_a), или их комбинаций; 2) концентрация напряжений в зоне контакта заполнителя с матрицей отсутствует; 3) при совместном разрушении матрицы и заполнителя разрушение элементарной ячейки происходит по равнопрочным плоскостям.

При разрушении по четвертой схеме (наиболее общий случай разрушения (рис. 7.48, а) можно написать:

$$F = R_m [a^2 - \pi(r^2 - x^2)] + R_a \pi(x_1^2 - x^2) + R_3 \pi(r^2 - x_1^2), \quad (7.91)$$

где F — разрушающая сила; R_m, R_a, R_3 — соответственно пределы прочности на растяжение матрицы, контактной зоны и заполнителя; a — размер ребра элементарной ячейки; r — радиус заполнителя; x — расстояние от центра заполнителя до плоскости разрушения матрицы; x_1 — то же, до плоскости разрушения заполнителя.

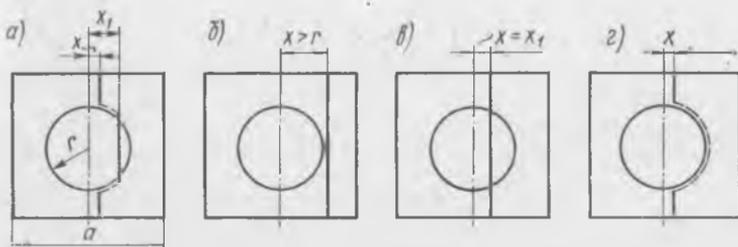


Рис. 7.48. Схемы разрушения элементарной ячейки:

а — сложное разрушение; б — по матрице; в — по заполнителю; г — по матрице и контактной зоне

Первое слагаемое — часть разрушающей силы F , которая воспринимается матрицей, второе слагаемое — часть силы F , воспринимаемая контактной зоной, и третье слагаемое — часть силы F , которая воспринимается заполнителем. Принимая $a=1$ исходя из третьего допущения, можно написать: $F=3R_m[1-\pi(r^2-x^2)]$; $F=3R_{a\pi}(x_1^2-x^2)$ и $F=3R_{3\pi}(r^2-x_1^2)$, откуда

$$x = \sqrt{(F - 3R_m + 3R_{m\pi}r^2)/(3R_{m\pi})}; \quad (7.92)$$

$$x_1 = \sqrt{r^2 - F/(3R_{3\pi})}; \quad (7.93)$$

$$F = 3R_m R_a R_3 / (R_m R_3 + R_m R_a + R_a R_3). \quad (7.94)$$

Сложное разрушение произойдет, если будут соблюдены условия: $R_{a\pi}(x_1^2-x^2) + R_{3\pi}(r^2-x_1^2) < R_{m\pi}(r^2-x^2)$; $R_{3\pi}(r^2-x_1^2) < R_{a\pi}(r^2-x_1^2)$ и $R_{a\pi}(x_1^2-x^2) < R_{m\pi}(r^2-x^2) - R_{m\pi}(r^2-x_1^2)$, откуда следует, что $R_3 < R_a < R_m$. Разрушение по первой схеме (рис. 7.48, б) произойдет, если $\pi R_3 r^2 > R_{m\pi} r^2$; $R_{m\pi} r^2 < R_{a\pi} r^2$ и $x = x_1 \geq r$ и формула (7.91) при $a=1$ примет вид

$$F = R_m \text{ при } R_a > R_m; R_3 > R_m. \quad (7.95)$$

Разрушение по второй схеме (7.48, в) происходит при $x = x_1 < r$, тогда формула (7.91) при $a=1$ примет вид

$$F = R_m [1 - \pi(r^2 - x^2)] + R_3 \pi(r^2 - x^2). \quad (7.96)$$

Разрушение по этой схеме будет происходить при соблюдении условия: $R_{3\pi}(r^2-x^2) < R_{a\pi}(r^2-x^2)$ и $R_{3\pi}(r^2-x^2) < R_{m\pi}(r^2-x^2)$, откуда $R_3 < R_a$; $R_3 < R_m$.

Согласно третьему допущению, $R_m[1-\pi(r^2-x^2)] = R_{3\pi}(r^2-x^2)$, откуда

$$x = \sqrt{r^2 - R_m / [\pi(R_m + R_3)]}; \quad (7.97)$$

$$F = 2R_m R_3 / (R_m + R_3). \quad (7.98)$$

Разрушение по третьей схеме (рис. 7.48, г) будет при $x < x_1 \leq r$, тогда формула (7.91) при $a=1$ примет вид

$$F = R_m [1 - \pi(r^2 - x^2)] + R_a \pi(r^2 - x^2). \quad (7.99)$$

При этом должны быть соблюдены условия $R_{3\pi}(r^2-x^2) > R_{a\pi}(r^2-x^2)$ и $R_{a\pi}(r^2-x^2) < R_{m\pi}(r^2-x^2)$, т. е. $R_a < R_3$; $R_a < R_m$.

Согласно третьему допущению, $R_m[1-\pi(r^2-x^2)] = R_{a\pi}(r^2-x^2)$, откуда

$$x = \sqrt{r^2 - R_m / [\pi(R_m + R_a)]}; \quad (7.100)$$

$$F = 2R_m R_a / (R_m + R_a). \quad (7.101)$$

Поскольку прочность композиционного материала в целом будет зависеть от прочности элементарной ячейки $R = f(R_3)$, задача сводится к нахождению экспериментальным путем функции f .

Проведенный анализ схем разрушения, а также исследований

в области прочности композиционных материалов позволяет сделать общие качественные выводы. Можно считать, что прочность композита возрастает при: уменьшении диаметра заполнителя и увеличении его прочности; увеличении толщины связки и ее адгезии к заполнителю; повышении плотности вспененной связки межгранульного пространства; увеличении количества заполнителя в материале, если его прочность выше прочности связки, и наоборот— если она ниже.

Таким образом, при подборе состава материала по приведенным формулам следует исходить из высказанных качественных зависимостей прочности, а затем проведением эксперимента уточнить прочностные характеристики и состав материала.

Обычно в технике подобные методы исследования носят название расчетно-экспериментальных. Причем чем более точен расчет и подробнее в применяемых расчетных формулах вскрывается физическая взаимосвязь между отдельными элементами системы, тем проще проведение эксперимента и надежнее конечные результаты.

В приведенной задаче не рассматривалось влияние технологических факторов на конечный результат. Оптимизация задач такого типа тем сложнее, чем большее количество технологических факторов должно учитываться в ней и чем сложнее сама технология получения материала.

Представим какой-либо строительный материал, допустим бетон, как систему, имеющую входные и выходные параметры (рис. 7.49). Пусть этот материал изготавливают на действующем предприятии, оборудование которого не может меняться, а технологические параметры могут быть изменены в тех пределах, которые допусти-

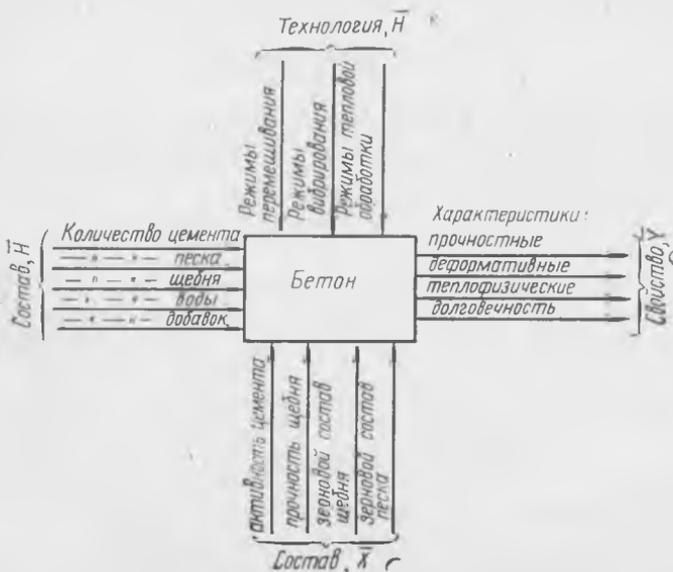


Рис. 7.49. Схема внешних связей системы «бетон»

мы параметрами установленного оборудования. Входами системы «бетон» является его состав и технологические параметры производства. Причем количество цемента, песка, щебня, воды и добавок является контролируемыми и регулируемыми входами H , а активность цемента, прочность щебня, зерновой состав крупного и мелкого заполнителя — контролируемыми, но нерегулируемыми входами X (что пришло на завод, то и надо использовать), на которые наложены ограничения (по соответствующим ГОСТам). Технологические параметры также относятся к контролируемым и регулируемым входам H , имеющим ограничения по возможностям регулировки, исходя из возможностей установленного оборудования. Например, время перемешивания и вибрирования бетонной смеси можно менять, а скорость оборотов бетоносмесителя, частоту и амплитуду колебаний виброплощадки нельзя.

Пусть требуется получить бетон максимальной морозостойкости. Показатель морозостойкости может быть выбран критерием оптимизации, поскольку он единственный, имеет числовое выражение ($R_{\text{мрз}}$ выражается в циклах попеременного замораживания и оттаивания) и монотонно изменяется. В этом случае оптимизацию следует проводить по составу бетона и технологическим параметрам его изготовления. Оптимизацию состава можно провести по методу, предложенному Ю. М. Баженовым, Г. И. Горчаковым и др.* Метод заключается в совместном рассмотрении многофакторных моделей, при подстановке в уравнения которых числовых значений, характеризующих исходные материалы, эти уравнения превращаются в двухфакторные, выражающие зависимость свойств бетонных смесей и бетонов от структурных характеристик жесткости $J = f(C, V/\Pi_{\text{ист}})$, прочности $R_b = f'(C, V/\Pi_{\text{ист}})$, плотности $\rho = f''(C, V/\Pi_{\text{ист}})$, морозостойкости $R_{\text{мрз}} = f'''(C, V/\Pi_{\text{ист}})$, склонности к растрескиванию $K_c = f''''(C, V/\Pi_{\text{ист}})$. В этих зависимостях c — объемная концентрация цементного теста в бетонной смеси; $V/\Pi_{\text{ист}}$ — истинное водоцементное отношение. Структурные характеристики находят, решая совместно уравнения: прочности и жесткости; жесткости и морозостойкости; жесткости и склонности к растрескиванию; жесткости и плотности.

Влияние технологических факторов проще выявить, составив структурную блок-схему системы по принципу, изложенному в гл. 2 (см. рис. 2.3). Способы выявления этих зависимостей и методы планирования эксперимента изучаются в специальных курсах.

В заключение следует отметить, что оптимизация технологических процессов неразрывно связана с необходимостью повышения уровня механизации и автоматизации технологии в целом, повышения общей культуры производства. Можно как угодно хорошо разработать способы оптимизации системы, но при общей низкой культуре производства, сохранении регулирования отдельных па-

* См.: Получение бетона заданных свойств. Ю. М. Баженов, Г. И. Горчаков, Л. А. Алимов и др. М., 1978.

раметров вручную, отсутствии четкого, хорошо налаженного автоматизированного контроля на отдельных стадиях технологического процесса неизбежно будут нарушаться выбранные технологические параметры.

§ 7.8. Автоматизированные системы управления

Одним из важнейших направлений повышения эффективности производства, качества продукции, роста производительности труда, совершенствования форм и методов управления является внедрение в промышленность средств вычислительной техники и автоматизированных средств управления.

Основной целью любой системы управления является обеспечение оптимального функционирования объекта управления. Для достижения этой цели система управления должна выполнять: сбор информации о текущем состоянии объекта; реализацию найденных оптимальных режимов на объекте.

Выполнение этих функций возлагается на управленческий персонал (оператор, диспетчер, мастер, начальник цеха и т. д.) и всевозможные технические средства (датчики, регуляторы, исполнительные механизмы, линии связи и др.). В зависимости от сложности системы и степени оснащенности ее техническими средствами распределение обязанностей по выполнению функций управления между персоналом и техническими средствами может быть различным. Уже сейчас во многих системах управления объектами в промышленности строительных материалов сбор информации производится техническими средствами. При этом на управленческий персонал возлагается задача обобщения и осмысливания этой информации и, самое главное, оптимизация работы объекта. При таком положении управление системой носит субъективно-интуитивный характер и результаты функционирования объекта существенно зависят от личных свойств управленческого персонала.

В *автоматизированных системах* управления (АСУ) сбор и оперативная обработка информации, а также нахождение оптимальных режимов работы системы осуществляется техническими средствами (в основном ЭВМ). Анализ этих режимов и их реализация возлагается на управленческий персонал, использующий технические устройства.

В *автоматических системах* функции сбора информации, нахождения и реализации оптимальных режимов осуществляются техническими средствами без вмешательства управленческого персонала. Таким образом, автоматическая система является предельным случаем АСУ.

Любая АСУ промышленности строительных материалов относится к классу многоуровневых (иерархических) систем управления. На рис. 7.50 представлена схема взаимодействия автоматизированных систем различных уровней управления. Принципиально система управления, находящаяся на i -м уровне иерархии, может иметь внешние связи с выше- и нижестоящими системами управле-

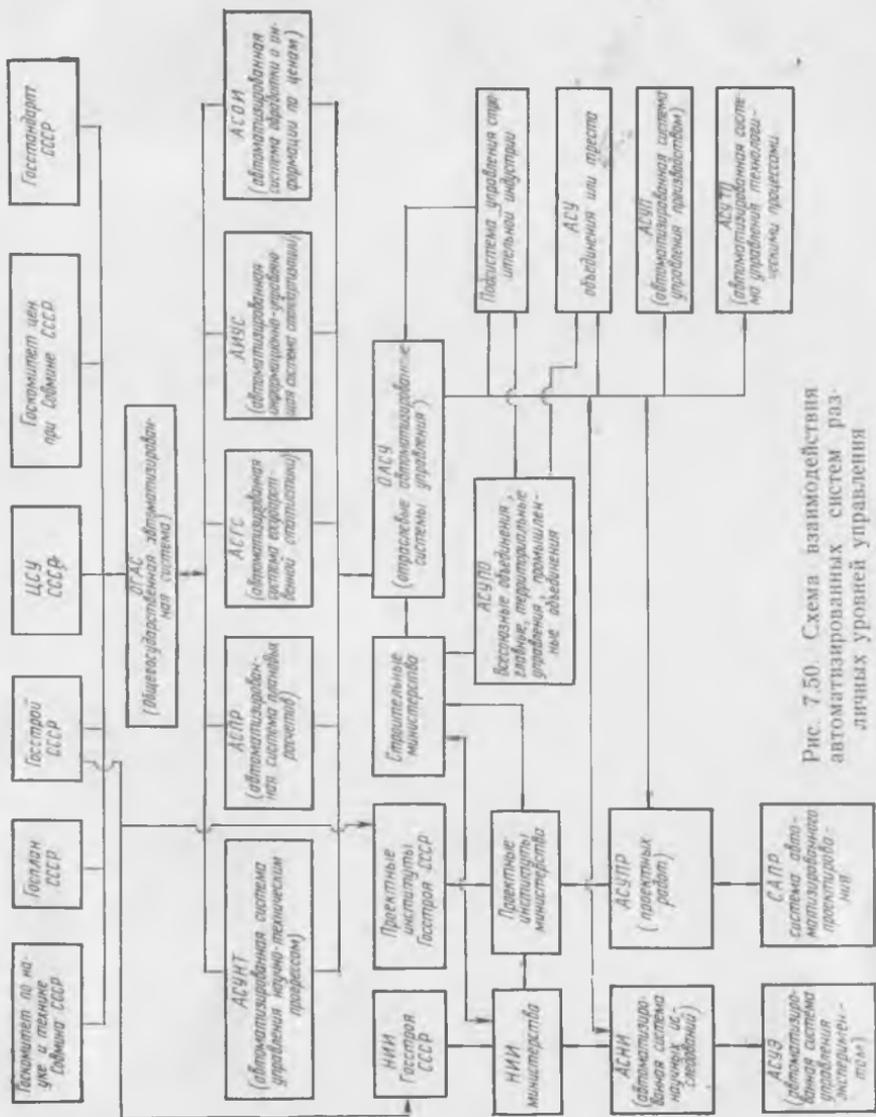


Рис. 7.50. Схема взаимодействия автоматизированных систем различных уровней управления

установок, включенных в технологический процесс. Ряд алгоритмов и программ ЭВМ предназначен для получения информации от ниже- и вышестоящих АСУ, а также от смежных систем управления.

Поступающая в АСУ информация используется для оперативного вычисления значений критериев качества функционирования технологического процесса. Управляющие функции заключаются в нахождении оптимальных управлений и реализации управляющих воздействий на объекте.

В зависимости от сложности системы АСУТП и принятой системы распределения функций между техническими средствами и управленческим персоналом различают следующие режимы управления: 1) информационно-советующий, при котором технические средства вырабатывают только рекомендации по рациональному управлению, а само управление процессами осуществляется оператором; 2) комбинированный, когда ЭВМ автоматически изменяют параметры настройки конкретных систем регулирования; 3) прямое управление, при котором ЭВМ непосредственно воздействует на исполнительные механизмы регулирующих органов.

По характеру протекания технологического процесса во времени АСУТП могут быть предназначены для непрерывных и дискретных производств.

На рис. 7.52 представлена типовая схема управления технологическими процессами на заводах ЖБИ. Из приведенной схемы следует, что каждый отдельный технический передел (сравните с рис. 2.3) является объектом управления, который может включать один или несколько технологических агрегатов или установок. Например, управление приготвлением бетонной смеси включает в себя управление дозирующими устройствами, в том числе и системой загрузки компонентов и их выгрузки из дозаторов, непосредственно перемешивая в бетоносмесителе, и подачи готового бетона к местам формовки.

Процесс создания АСУТП складывается из нескольких стадий, каждая из которых подразделяется на этапы, включающие определенный перечень работ. В зависимости от сложности системы (типовая однофункциональная или оригинальная многофункциональная) срок разработки и внедрения АСУТП на предприятиях промышленности строительных материалов составляет от 3 до 8 лет.

САПР. На эффективность всего общественного производства значительное влияние оказывает проектирование. Непрерывный рост капитальных вложений и соответственно объемов проектных работ, усложнение проектирования в связи с научно-техническим прогрессом предопределили постановку задачи, связанной с необходимостью механизации и автоматизации значительной части работ как по самой технологии проектирования, так и по автоматизированным системам управления проектными организациями.

Автоматизированные системы проектирования, как и любые АСУ, представляют иерархическую систему и имеют ряд подсистем.

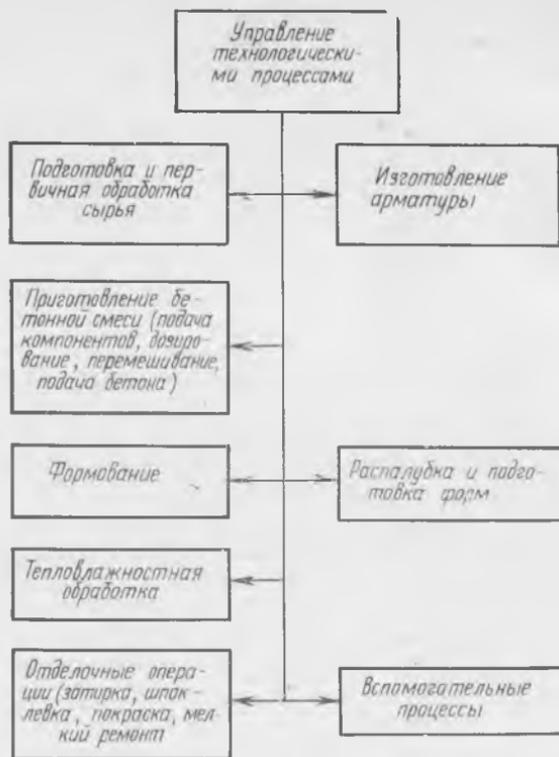


Рис. 7.52. Типовая схема управления технологическими процессами на заводах ЖБИ

тем, предназначенных для решения локальных задач. Инженера-технолога прежде всего интересуют те из них, которые связаны с проектированием промышленного предприятия. Принципиальная технологическая схема проектирования предприятия строительной индустрии приведена на рис. 7.53.

Технологию проектирования предприятия можно разбить на три части: прогнозирование и технико-экономическое обоснование (ТЭО), технологическую, строительную. Каждую часть, в свою очередь, делят на этапы, включающие комплексы задач, объединяемых проектировщиком для выбора варианта по одной из частей проектируемого объекта.

Методические вопросы автоматизации проектирования, связанные с прогнозированием, технико-экономическим обоснованием и разработкой строительной части в настоящее время можно считать разработанными ведущими строительными и проектными организациями. Что же касается вопросов автоматизации проектирования технологии, специального (не типового) технологического оборудования, его компоновки, т. е. именно тех работ,

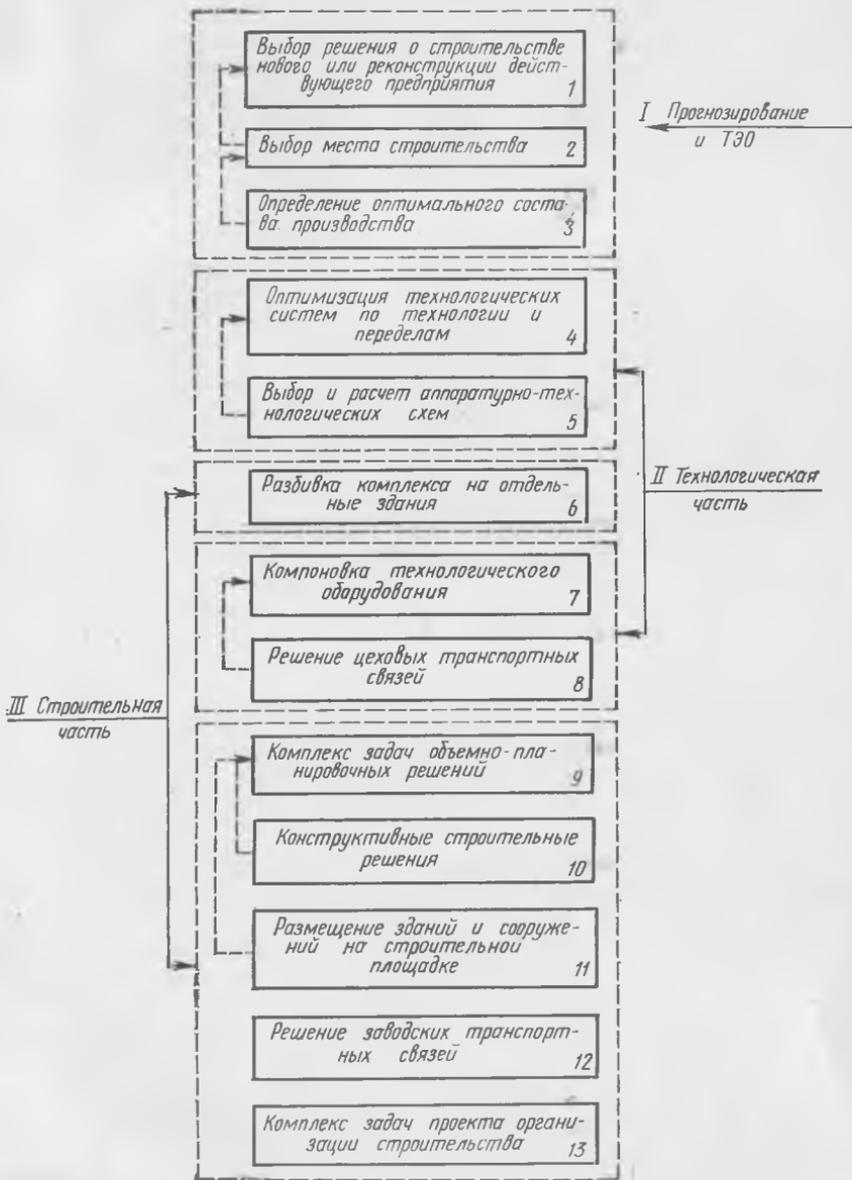


Рис. 7.53. Принципиальная технологическая схема проектирования предприятий стройиндустрии

которые выполняются технологами, то они, во всяком случае в промышленности строительных материалов, находятся в начальной стадии. Наиболее сложными в перечисленных задачах являются вопросы оптимальной компоновки технологического оборудования, особенно в многоэтажных промышленных зданиях. Так, при проектировании заводов полимерных строительных материалов капитальные затраты на проектируемый объект могут изменяться до 30% в зависимости от компоновочных решений по размещению технологического оборудования и внутрицеховых транспортных связей.

Значительная материалоемкость большинства производств стройиндустрии выдвигает перед технологом-проектировщиком обязательное требование по учету транспортных связей грузопотоков как между отдельными цехами, так и внутри основного производственного корпуса.

Исходными данными в задаче компоновки являются: описание аппаратов и установок; типы элементов системы транспортирования; схема движения массопотоков и их описание; параметры для учета ограничений; параметры для оценки качества компоновки. В общем случае задачей компоновки является определение габаритов и взаимного расположения зданий, расположения аппаратов и установок в строительной сетке, построение системы транспортирования грузопотоков. Для выполнения компоновки необходимо знать ограничения, которым должно удовлетворять компоновочное решение (технологических, строительных, техники безопасности, обслуживания и т. п.), а также критерий (один или несколько) для оценки компоновочного решения.

Для эффективного решения этих задач на ЭВМ и отсеечения заранее непригодных вариантов необходимо формализовать основные условия компоновки оборудования:

1) требование взаимного непересечения аппаратов при их компоновке;

2) необходимость предусмотреть вокруг каждой установки свободной площади, предназначенной для обслуживания и ремонта;

3) определить внутри цеха зоны, свободные от оборудования и предназначенные для промежуточного складирования (например, арматурных каркасов, готовой продукции), ремонта (форм, готовых изделий), отделки или комплектации готовой продукции и т. п.

4) определить размещение оборудования внутри строительной сетки;

5) предусмотреть расстояние между самими аппаратами, между ними и строительными конструкциями, определяемые требованиями техники безопасности;

6) определить расположение транспортных связей по границам компоновочных зон.

К этой серии ограничений можно добавить и ряд других, имеющих значение для ряда специфического оборудования или производств (например, установку ряда агрегатов на нулевой отметке). Однако необоснованное увеличение ограничений приведет к значи-

тельному усложнению получения вариантов компоновки на ЭВМ. В качестве количественной оценки различных вариантов могут быть предложены показатели: коэффициент плотности заполнения площади или объекта строительных сооружений технологическими агрегатами и установками, минимум затрат на транспортировку массопотоков, отношение стоимости строительных конструкций к стоимости технологического оборудования и ряд других. Таким образом, при автоматизации проектирования возникает необходимость в четкой формулировке формализованной задачи компоновки. Однако сложность формализации многочисленных ограничений и пожеланий приводит к тому, что достаточно полная единая математическая модель оказывается беспомощной для решения этой задачи.

Представляется целесообразным построение нескольких математических моделей, отражающих различные аспекты или подзадачи, возникающие в процессе решения.

Таким образом, на различных стадиях процесса компоновки необходимо пользоваться разной степенью идеализации и в соответствии с этим разными математическими моделями для описания одних и тех же объектов. Это соображение справедливо не только для САПР, но и для любых АСУ, находящихся на любой ступени иерархической лестницы.

АСНИ. В современных научных исследованиях обычно принимают участие большие коллективы. Поэтому проблеме управления научными исследованиями по многим параметрам аналогична проблема управления организационными системами. В широком смысле понятие автоматизации научных исследований представляет собой комплексную проблему автоматизации всего фронта современных научных исследований, начиная от проблем организации и управления наукой как отрасли народного хозяйства и кончая автоматизацией конкретных фундаментальных или прикладных исследований, имеющих четкое направление (рис. 7.54). При автоматизации научных исследований в конкретной области можно выделить: уровень автоматизации планирования исследований, уровень координации научных экспериментов и уровень автоматизации проведения отдельных экспериментов. Современные экспериментальные исследования имеют свою специфику и отличаются следующими особенностями: 1) трудностью, а нередко и невозможностью непосредственного наблюдения исследуемых явлений; 2) статистическим характером информации об исследуемом явлении; 3) наличием нескольких путей реализации планов эксперимента; 4) сложностью оборудования, участвующего в эксперименте; 5) большим объемом измеряемых и регистрируемых параметров и сложностью обработки полученных данных.

В этих условиях проведение сложных экспериментальных работ становится невозможным без привлечения средств автоматизации, т. е. без создания автоматизированных средств управления экспериментом (АСУЭ). Технология проведения самого эксперимента может быть разбита на несколько этапов, в соответствии с

которыми структура АСУЭ будет включать следующие подсистемы: планирование эксперимента, подготовку эксперимента, проведение эксперимента, обработку результатов эксперимента. Помимо разделения на функциональные подсистемы при разработке и эксплуатации АСУЭ, как и любой большой системы АСУ, целесообразно выделение ряда *обеспечивающих подсистем*: информационного, математического, программного и технического обеспечения.



Рис. 7.54. Принципиальная схема управления научными исследованиями

Информационное обеспечение АСУЭ представляет собой совокупность данных для проведения экспериментальных исследований, методов и программных средств организации, наполнения, хранения и обработки информационных массивов и выдачу соответствующей информации как в процессе проведения эксперимента, так и результирующих данных по его окончании.

Под *математическим обеспечением* понимают совокупность математических методов, моделей и алгоритмов для решения задач управления экспериментами и обработка экспериментальной информации.

Техническое обеспечение АСУЭ представляет собой совокупность средств измерительной, вычислительной техники и средств передачи информации, объединенных единым целевым назначением.

В программное обеспечение входят программы вычислительных комплексов различного уровня, набор пакетов прикладных программ и база данных эксперимента. Подобное деление программного обеспечения достаточно условно и зависит от сложности самой АСУЭ.

Приведенные в этом разделе основные принципы АСУ не исчерпывают всех особенностей разработки и эксплуатации АСУТП,

САПР, АСНИ, которые излагаются в специальной литературе. Наша задача была значительно скромнее: инженер-технолог должен четко понимать, что при современном развитии техники управлять все более усложняющимися технологическими процессами, разрабатывать новые технологии и материалы невозможно без разработки и внедрения соответствующих систем АСУ, какими бы сложными и трудоемкими они ни были.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Далеко не все вопросы, изложенные в учебнике, исчерпывают, по мнению автора, необходимое содержание курса «Процессы и аппараты в технологии строительных материалов и изделий». В частности, вопросы прочности композиционных материалов изложены не в том объеме, в котором хотелось бы их показать. Это касается и методов получения пористых материалов и реологии бетонных, керамических и полимерных композиций. Автор надеется, что эти вопросы найдут достаточное отражение в специальных технологических дисциплинах. Сжатость изложения этих вопросов объясняется как ограниченным объемом учебника, так и недостаточной научной и практической разработкой отдельных моментов, связанных с технологическими процессами. Некоторые положения по процессам, протекающим в самом материале, носят дискуссионный характер, что нашло отражение в отдельных разделах учебника. Ознакомление студентов с различными подходами к решению одних и тех же вопросов позволит им более осмысленно подойти к изучению этого материала.

Курс «Процессы и аппараты...» требует глубоких знаний по специальным разделам физики, химии, механики, гидравлики, теплотехники. В связи с этим в некоторых вузах страны чтение отдельных разделов передано на специальные кафедры: механические процессы — кафедрам механического направления, гидромеханические — кафедрам гидравлики, тепловые — кафедрам теплотехники. Как показала практика, такое расчленение курса снижает ценность основной идеи дисциплины — применение основных законов базисных технических дисциплин к технологическим процессам, протекающим как в отдельных аппаратах, так и в материале. По мнению автора, только достаточно квалифицированный инженер-технолог в состоянии увязать эти законы с техническими особенностями отдельных производств. Его инженерный опыт технолога позволит показать студентам связь этих законов с практической деятельностью. Дальнейшее развитие курса должно идти по пути создания типовых процессов по отдельным технологическим стадиям, глубокой практической проработке вопросов оптимизации как отдельных стадий, так и всего процесса в целом. Совершенствование этой дисциплины повлияет на дальнейшее развитие специальных технологических дисциплин.

ЛИТЕРАТУРА

- Ахвердов И. Н. Основы физики бетона. М., 1981.
- Баженов Ю. М., Комар А. Г. Технология бетонных и железобетонных изделий. М., 1984.
- Бауман В. А., Клушанцев Б. В., Мартынов В. Д. Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций. М., 1981.
- Боженев П. И. Технология автоклавных материалов. М., 1978.
- Будников П. П., Полубояринов Д. Н. Химическая технология керамики и огнеупоров. М., 1972.
- Буров Ю. С. Технология строительных материалов и изделий. М., 1972.
- Волженский А. В., Буров Ю. С., Колокольников В. С. Минеральные вяжущие вещества. М., 1979.
- Воробьев В. А., Андрианов Р. А. Технология полимеров. М., 1980.
- Вялов С. С. Реологические основы механики грунтов. М., 1978.
- Гершберг О. А. Технология бетонных и железобетонных изделий. М., 1971.
- Горлов Ю. П., Еремин Н. Ф., Седунов Б. У. Огнеупорные и теплоизоляционные материалы. М., 1976.
- Горлов Ю. П., Меркин А. П., Устенко А. А. Технология теплоизоляционных материалов. М., 1980.
- Горчаков Г. И. Строительные материалы. М., 1981.
- Горчаков Г. И., Мурадов Э. Г. Основы стандартизации и контроля качества продукции. М., 1977.
- Екобори Т. Физика и механика разрушения и прочности твердых тел. М., 1971.
- Жуков Д. В. Основы теории и техники сушки теплоизоляционных изделий. М., 1974.
- Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М., 1973.
- Кайнарский И. О. Процессы технологии огнеупоров. М., 1969.
- Киселев П. Г. Гидравлика. М., 1980.
- Кучеренко А. А. Тепловые установки заводов сборного железобетона. Киев, 1977.
- Лариков Н. Н. Теплотехника. М., 1985.
- Марьямов Н. Б. Тепловая обработка изделий на заводах сборного железобетона. М., 1970.
- Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. М., 1977.
- Никифорова Н. М. Теплотехника и теплотехническое оборудование предприятий промышленности строительных материалов и изделий. М., 1981.
- Основы физики и химии полимеров/Н. В. Михайлов и др. М., 1977.
- Перегудов В. В., Роговой М. И. Тепловые процессы и установки в технологии строительных изделий и деталей. М., 1983.
- Плановский А. Н., Николаев П. И. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии. М., 1972.
- Процессы и аппараты в технологии строительных материалов/И. М. Борщ и др. Киев, 1981.
- Прыкин Б. В. Проектирование и оптимизация технологических процессов заводов сборного железобетона. Киев, 1976.
- Роговой М. И. Технология искусственных пористых заполнителей и керамики. М., 1974.
- Романков П. Г., Рашковская Н. Б., Фролов В. Ф. Массообменные процессы химической технологии. Л., 1975.
- Рыбьев И. А. Строительные материалы на основе вяжущих веществ. М., 1978.
- Силенок С. Г. Механическое оборудование предприятий строительной индустрии. М., 1973.
- Технология минеральных теплоизоляционных материалов и легких бетонов/К. Э. Горайнов, К. Н. Дибенецкий, С. Г. Васильков, Л. Н. Попов. М., 1976.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Абсорбция 156, 223
Адгезия 340
Адсорбция 156
- Баланс материальный 40
— энергетический 40
Бернулли уравнение 93
- Вибрирование 208
Влажность 224
Вязкость динамическая 78, 85, 91
— кинематическая 78
— пластическая 114
— турбулентная 84
- Гидравлика 76
Гидродинамика 81
Гидромеханика 76
Гидростатика 78
Градиент давлений 170, 228
— влагосодержаний 170, 228
— температур 132, 170, 228
Гриффице теория 58
Грохочение 67
— эффективность 73
— виды 74
- Давление гидростатическое 77
Дефекты кристаллов 54
Диаметр средний 70
— эквивалентный 82, 107
Диффузия 39, 57, 233, 242
- Жидкость 78
— ньютоновская 78, 112
— ньютоновская 78
— расход 81, 84
- Зерновой состав 177
- Излучение тепловое 132, 136
Измельчение 42, 175
— законы 46
— методы 44
— степень 47, 183
Измельчители 45, 187
Интенсивность сушки 10
— процесса 41
— колебаний 209
- Качество 174
Классификация гидравлическая 193
— механическая 67
— по крупности 67, 175, 193
— процессов 13
Когезия 219
Компромисс 251
Конвекция 133
- Кондукция см. теплопроводность
Консистенция 204
Коэффициент влагоотдачи 171
— теплопроводности 170
— всучивания 245
— гидравлического трения 202
— диффузии 163, 167
— концентрации напряжений 59
— массоотдачи 165
— массопередачи 158
— массопроводности 168
— полезного действия 41, 122, 153
— размолоспособности 66
— стеснения 105, 120
— сферичности 73
— теплопроводности 133
— теплообмена излучением 136
— теплоотдачи 134
— теплопередачи 138
— теплопроводности 132
— термического расширения 61
— уплотнения 9
— эффективности нормативный 174
- Критерий геометрический 92
— гомотронности 92
— гидравлический Лагранжа 92
— — Рейнольдса 84, 92, 202
— — Фруда 92, 202
— — Эйлера 92, 202
— Кирпичева 231
— массообменный Био 169
— — Нуссельта 166
— — Пекле 166
— — Фурье 166, 169
— модифицированный мощности 202
— — Рейнольдса 202
— — Фруда 202
— — Эйлера 202
— — Ньютона 29
— тепловой Био 138
— — Галлилея 141
— — Грасгофа 136
— — Нуссельта 135
— — Пекле 135
— — Прандтля 135
— — Фурье 135
— оптимизации 248
— трещиностойкости см. Кирпичева
- Литье 219
- Массопередача, массоотдача 144, 156
Модели классификация 37
Моделирование математическое 18, 38
— физическое 38
- Напор геометрический 80, 93
— динамический 94

- потери 95, 97, 124
- статический 80, 93
- температурный 132

Обжиг 10, 372

Ограничения 249

Операция технологическая 7

Отрасль промышленности 7

Перемешивание 9, 198

Перенос вещества конвективный 39, 165

— — молекулярный 39, 163

Подготовка компонентов 9, 175

Пластичность 204

Плотность потока влаги 168, 229

— — тепла 132, 228, 233

Поверхность изотермическая 132

— удельная 65, 107

Подобие геометрическое 20

— инвариант 22

— индикатор 29

— константа 27

— критерий 29, 92, 135, 166, 202, 348

— теория 26

— теоремы 28

Поле температурное 132

Прессование 213

Принцип компромиссов 251

— Ле-Шателье 40

Процессы 13

— интенсивность 42

— период, продолжительность 15

— рабочая линия 158

— степень непрерывности 15

— технологические 7

— оптимизация 248

— стадии 8

Прочность теоретическая 51

— истинная 58

Псевдооживление

— скорость 109

— число 110

Пустотность 178

Радиус гидравлический 89

— гидродинамический 127

Свиль 219

Себестоимость 174

Система

— анализ 17

— связи 19

— управления 20

Скорость витания 105

— колебаний 209

Сопротивление термическое 138

Спекание жидкое 241

— твердофазовое 142

Структура кристаллическая 51

— коагуляционно-тиксотропная и конденсационно-кристаллическая 207

Сушка 10

Технология 7

Тепловая обработка 10, 176, 223, 232, 238

Теплоемкость 140

Тепловлажностная обработка 11, 232

Теплообмен внешний 146

— внутренний 148

— излучением 136

— конвекцией 133

— при кипении 142

— при кристаллизации 144

— при конденсации 140

— при растворении 145

— сложный 137

— теплопроводностью 132

Теплота парообразования 140

Тиксотропия 208

Усадка 226, 238

Ускорение колебаний 209

Условия краевые 31

Формование 9, 23

Целевая функция 250

Центрифугирование 211

Экстрагирование 156

Экструзия 219

Ядро

— дислокация 55

— потока 87

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
Введение	4
Глава 1. Общие сведения	7
§ 1.1. Краткая характеристика основных стадий технологического процесса	7
§ 1.2. Классификация основных процессов	13
Глава 2. Основы моделирования систем, процессов и аппаратов	17
§ 2.1. Основные принципы системного анализа	17
§ 2.2. Метод подобия как основа исследования	25
§ 2.3. Теоремы подобия. Метод анализа размерностей	28
§ 2.4. Моделирование как метод научного исследования. Основные принципы моделирования	35
2.5. Общие принципы анализа и расчета процессов. Изоморфность уравнений переноса	39
Глава 3. Механические процессы и аппараты	42
§ 3.1. Процессы измельчения в промышленности строительных материалов. Классификация измельчителей	42
§ 3.2. Основные законы измельчения	46
§ 3.3. Теоретическая и истинная прочность материала	50
§ 3.4. Физико-химическая активация процесса измельчения	63
§ 3.5. Кинетика измельчения и размолоспособность	65
§ 3.6. Методы механической классификации грубозернистых и дисперсных материалов	67
Глава 4. Гидромеханические процессы и аппараты	76
§ 4.1. Общие положения	76
§ 4.2. Гидростатика. Дифференциальные уравнения равновесия Эйлера	78
§ 4.3. Основное уравнение гидростатики и его практическое применение	79
§ 4.4. Гидродинамика. Основные определения	81
§ 4.5. Ламинарное и турбулентное движения жидкости	82
§ 4.6. Распределение скоростей и расход жидкости в потоке	84
§ 4.7. Уравнение неразрывности потока	87
§ 4.8. Дифференциальные уравнения Эйлера и Навье—Стокса	89
§ 4.9. Уравнение Бернулли	93
§ 4.10. Гидравлические сопротивления в трубопроводах	94
§ 4.11. Внешняя задача гидродинамики	102
§ 4.12. Осаждение частиц под действием силы тяжести	105
§ 4.13. Смешанная задача гидродинамики	106
§ 4.14. Гидродинамика взвешенного слоя	108
§ 4.15. Пленочное течение жидкости и барботаж	110
§ 4.16. Течение неньютоновских жидкостей	112
§ 4.17. Пневмо- и гидротранспорт	119
	279

	Стр.
Глава 5. Тепловые процессы и аппараты	131
§ 5.1. Основы теплопередачи	131
§ 5.2. Теплообмен при изменении агрегатного состояния	139
§ 5.3. Внешний и внутренний теплообмен	146
§ 5.4. Движущая сила тепловых процессов	149
§ 5.5. Классификация установок для тепловой обработки строительных материалов	152
Глава 6. Основы массопередачи	156
§ 6.1. Классификация массообменных процессов	156
§ 6.2. Механизм и движущая сила массообменных процессов	157
§ 6.3. Основные законы массопередачи	163
§ 6.4. Массопередача в твердой фазе. Перемещение влаги в капиллярно-пористых телах	167
Глава 7. Основные стадии технологического процесса при производстве строительных материалов	172
§ 7.1. Экономичность технологического процесса и его связь с качеством продукции и производительностью	172
§ 7.2. Подготовительные процессы	175
§ 7.3. Классификация материала в жидкой и воздушной средах	193
§ 7.4. Перемешивание компонентов и общие закономерности гомогенизации масс	198
§ 7.5. Классификация методов и общие закономерности формования изделий	203
§ 7.6. Тепловая обработка	223
§ 7.7. Принципы оптимизации технологических решений	247
§ 7.8. Автоматизированные системы управления	266
Заключение	275
Литература	276
Предметный указатель	277

Учебное издание

НИКОЛАЙ ФЕДОРОВИЧ ЕРЕМИН
Процессы и аппараты
в технологии строительных материалов

Зав. редакцией Ягунов Б. А. Редактор Попова Н. Н. Мл. редактор Кулькина Ю. П. Художник Александров А. С. Художественный редактор Бабикина В. П. Технический редактор Григорчук Л. А. Корректор Четчеккина Г. А.

ИБ № 4878

Изд. № СТР-422. Сдано в набор 21.10.85. Подл. в печать 25.03.86. Т-09521.
 Формат 60×90^{1/16}. Бум. кн. журн. Гарнитура литературная. Печать высокая.
 Объем 17,5 усл. печ. л. 17,5 усл. кр.-отт. 18,33 уч.-изд. л. Тираж 10 000 экз.
 Зак. № 1951 Цена 90 коп.

Издательство «Высшая школа», 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., д. 29/14.

Московская типография № 8 Союзполиграфпрома
 при Государственном комитете СССР
 по делам издательств, полиграфии и книжной торговли,
 101898, Москва, Центр, Хохловский пер., 7.