«Инфра-Инженерия»



Г. Т. Широкий
А. И. Сидорова

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ



УДК 691
ББК 38.3
Ш64

Рецензенты:

кафедра «Технология стекла и керамики» УО «Белорусский государственный технологический университет» (заслуженный деятель науки Республики Беларусь, доктор технических наук, профессор *И. А. Левицкий*);

директор Государственного предприятия «Институт жилища – НИПТИС им. Атаева С. С.» доктор технических наук, профессор *В. М. Пилипенко*

Широкий, Г. Т.

Ш64 Строительное материаловедение : учебное пособие / Г. Т. Широкий, А. И. Сидорова. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2024. – 616 с. : ил., табл.
ISBN 978-5-9729-1576-7

Излагаются основы строительного материаловедения, технологические аспекты производства современных востребованных строительных материалов, их сырье, формирование структуры, получение материалов с регулируемыми свойствами, показана взаимосвязь состава и структуры с требуемыми свойствами и области их применения.

Для студентов учреждений высшего образования по строительным специальностям, магистрантов, аспирантов, преподавателей и специалистов в области строительства.

УДК 691
ББК 38.3

ISBN 978-5-9729-1576-7

© Широкий Г. Т., Сидорова А. И., 2024
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2024
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 7

ГЛАВА 1. СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ 11
1.1. Составы и структура материалов 11
1.2. Структурно-физические свойства 14
1.3. Гидрофизические свойства 20
1.4. Теплофизические свойства 28
1.5. Эстетические свойства 34
1.6. Механические свойства 39
1.7. Эксплуатационные свойства 47

ГЛАВА 2. ПРИРОДНЫЕ КАМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ 57
2.1. Общие сведения и классификация горных пород 57
2.2. Породообразующие минералы 58
2.3. Магматические горные породы 64
2.4. Осадочные горные породы 71
2.5. Метаморфические горные породы 77
2.6. Материалы и изделия из природного камня 80
2.7. Защита от коррозии природных каменных материалов и изделий в сооружениях 86

ГЛАВА 3. ОСНОВЫ ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЯ 89
3.1. Общие сведения 89
3.2. Состав и строение древесины 90
3.3. Физико-механические свойства древесины и их показатели 98
3.4. Пороки и дефекты древесины 112

ГЛАВА 4. ДРЕВЕСНЫЕ МАТЕРИАЛЫ 119
4.1. Характеристика основных пород древесины, применяемых в строительстве 119
4.2. Формирование защитно-декоративных функций древесины 128
4.3. Лесо- и пиломатериалы 136
4.4. Профильные изделия, полуфабрикаты, композиционные и модифицированные древесные материалы 141
4.5. Напольные покрытия из древесины 154

ГЛАВА 5. СТРОИТЕЛЬНАЯ КЕРАМИКА 166
5.1. Общие сведения и классификация 166
5.2. Сырье для производства керамики 167
5.3. Основы производства керамических изделий 172
5.4. Стеновые материалы и изделия 174
5.5. Изделия для наружной и внутренней облицовки 184
5.6. Специальные керамические материалы и изделия 198

ГЛАВА 6. СИЛИКАТНОЕ СТЕКЛО 203
6.1. Общие сведения 203
6.2. Сырье и основы производства силикатного стекла 204
6.3. Физико-механические характеристики бесцветного листового стекла 207

6.4. Разновидности листового стекла ... 209
6.5. Светопрозрачные изделия и конструкции ... 221
6.6. Стекло в архитектурно-художественном оформлении зданий ... 225
6.7. Стеклокристаллические материалы и изделия ... 229

ГЛАВА 7. МЕТАЛЛЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ ... 233
7.1. Определение и классификация ... 233
7.2. Строение металлов ... 236
7.3. Общие сведения о железоуглеродистых сплавах ... 239
7.4. Чугун ... 244
7.5. Сталь ... 247
7.6. Термическая обработка металлов ... 257
7.7. Цветные металлы и сплавы ... 260
7.8. Металлические изделия ... 268
7.9. Коррозия металлов и способы защиты ... 271

ГЛАВА 8. МИНЕРАЛЬНЫЕ ВЯЖУЩИЕ ВЕЩЕСТВА ВОЗДУШНОГО ТВЕРДЕНИЯ ... 278
8.1. Определение и классификация ... 278
8.2. Магнезиальные вяжущие ... 279
8.3. Жидкое стекло ... 281
8.4. Кислотоупорный цемент ... 283
8.5. Гипсовые вяжущие ... 284
8.6. Известь строительная воздушная ... 289

ГЛАВА 9. МИНЕРАЛЬНЫЕ ВЯЖУЩИЕ ВЕЩЕСТВА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТВЕРДЕНИЯ ... 299
9.1. Общие сведения ... 299
9.2. Гидравлическая известь ... 300
9.3. Вяжущие автоклавного твердения ... 301
9.4. Производство портландцементов ... 302
9.5. Твердение портландцемента ... 306
9.6. Свойства портландцемента ... 310
9.7. Коррозия цементного камня ... 314

ГЛАВА 10. РАЗНОВИДНОСТИ ЦЕМЕНТОВ ... 317
10.1. Вещественный состав цементов ... 317
10.2. Классификация цементов ... 321
10.3. Разновидности цементов, их свойства и применение ... 322
10.4. Маркировка, транспортирование и хранение цементов ... 333

ГЛАВА 11. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БЕТОНОВ И СТРОИТЕЛЬНЫХ РАСТВОРОВ ... 335
11.1. Вода для бетонов и растворов ... 335
11.2. Заполнители ... 336
11.3. Арматура и закладные изделия ... 341
11.4. Фибра ... 347
11.5. Добавки ... 349

ГЛАВА 12. ОСНОВЫ БЕТОНОВЕДЕНИЯ ... 358
12.1. Определение и классификация бетонов ... 358
12.2. Расчет и подбор состава цементного бетона ... 360

12.3. Приготовление и транспортирование бетонной смеси 364
12.4. Технологические свойства бетонной смеси 367
12.5. Влияние различных факторов на удобоукладываемость бетонных смесей 372
12.6. Твердение бетона и уход за ним 375
12.7. Свойства затвердевшего бетона 377

ГЛАВА 13. РАЗНОВИДНОСТИ БЕТОНОВ 385
13.1. Общие сведения 385
13.2. Бетоны плотной структуры 385
13.3. Бетоны пористой структуры 392
13.4. Армированные бетоны 396
13.5. Бетоны на органических вяжущих 401
13.6. Бетоны на органических заполнителях 404

ГЛАВА 14. СТРОИТЕЛЬНЫЕ РАСТВОРЫ 409
14.1. Определение и классификация 409
14.2. Составы, приготовление и транспортирование растворных смесей 410
14.3. Показатели качества растворных смесей 412
14.4. Качественные показатели затвердевших растворов 414
14.5. Разновидности растворов 415
14.6. Сухие строительные смеси 418

ГЛАВА 15. ОРГАНИЧЕСКИЕ ВЯЖУЩИЕ ВЕЩЕСТВА 421
15.1. Определение и классификация 421
15.2. Битумы и битумные вяжущие 421
15.3. Дегти 425
15.4. Общие сведения о полимерах 426
15.5. Разновидности полимеров 431
15.6. Клеи 443

ГЛАВА 16. ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ (ПЛАСТМАССЫ) 457
16.1. Определение, классификация и свойства 457
16.2. Способы получения полимерных композиционных материалов 460
16.3. Стеновые и отделочные материалы и изделия 464
16.4. Материалы и изделия для устройства пола 470
16.5. Трубы и фитинги 481

ГЛАВА 17. ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ 492
17.1. Определение и классификация 492
17.2. Неорганические теплоизоляционные материалы и изделия 494
17.3. Органические теплоизоляционные материалы и изделия 501
17.4. Комбинированные (композиционные) теплоизоляционные изделия 506

ГЛАВА 18. АКУСТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ 511
18.1. Физические основы строительной акустики 511
18.2. Классификация акустических материалов и изделий 513
18.3. Основные свойства акустических материалов и изделий 515
18.4. Звукоизоляционные материалы и изделия 518
18.5. Звукопоглощающие материалы и изделия 522

ГЛАВА 19. ГИДРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ, КРОВЕЛЬНЫЕ И ГЕРМЕТИЗИРУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ 526
19.1. Общие сведения 526
19.2. Вязкопластичные материалы 529
19.3. Рулонные и пленочные материалы 536
19.4. Штучные и листовые кровельные материалы и изделия 548
19.5. Герметизирующие и уплотняющие материалы 566

ГЛАВА 20. ЛАКОКРАСОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ 580
20.1. Определение и классификация 580
20.2. Основные компоненты лакокрасочных составов 583
20.3. Механизм формирования лакокрасочных покрытий 591
20.4. Требования к качеству ЛКМ и покрытий 594
20.5. Материалы для подготовки поверхности к отделке 598
20.6. Материалы основного лакокрасочного слоя 602
20.7. Обозначение лакокрасочных материалов 612

РЕКОМЕНДУЕМАЯ УЧЕБНАЯ И СПРАВОЧНАЯ ЛИТЕРАТУРА 615

«Есть только одно благо – знание
и одно только зло – невежество»

Сократ, древнегреческий философ
(471–399 гг. до н. э.)

Глава 1
СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

1.1. Составы и структура материалов

Свойства строительных материалов формируются в процессе изготовления и в значительной степени определяются их составом и строением (рис. 1.1). *Состав* – это качественная и количественная характеристика вещества, материала, изделия. Знание состава сырья и материалов позволяет прогнозировать свойства получаемых изделий при изготовлении и получать их с заданными качественными характеристиками на длительный период эксплуатации. Различают химический, минеральный (минералогический), фазовый (твердый, жидкий, газообразный), вещественный и другие составы.

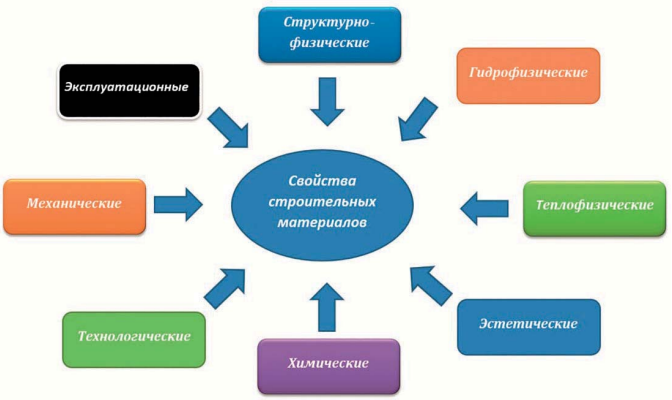

Рис. 1.1. Классификация основных свойств строительных материалов

Химический состав указывает на процентное содержание в материале химических элементов или оксидов и позволяет судить об их химической стойкости, прочности, огнестойкости, биостойкости и других свойствах. Например, в состав глины входят кремнезем SiO_2, глинозем Al_2O_3, оксиды железа Fe_2O_3, кальция CaO и другие соединения. С повышением содержания кремнезема SiO_2 снижается связующая способность глин и прочность в высушенном и обожженном состоянии изделий. Глинозем Al_2O_3 повышает пластичность и огнеупорность глин, прочность обожженных изделий. Оксид кальция CaO понижает тем-

пературу плавления, изменяет окраску обожженных изделий, повышает их пористость, снижает прочность и морозостойкость.

В зависимости от химического состава все материалы делятся на органические (древесина, битум, пластмассы), минеральные (бетон, цемент, кирпич, природный камень и др.) и металлы (сталь, чугун, алюминий). К *органическим* относят соединения углерода с другими элементами (преимущественно водородом, кислородом и азотом). В строительной практике находят применение и органоминеральные материалы, например, кремнийорганические полимеры (силиконы, полиорганосилоксаны), в молекулах которых имеется связь между атомами кремния и углерода. Это могут быть вязкие бесцветные жидкости, твердые эластичные вещества (каучуки) или хрупкие материалы – пластики. Каждая группа имеет свои особенности. Все органические материалы – горючие, минеральные – огнестойкие, металлы хорошо проводят электрический ток и теплоту и т. д.

Минералогический состав показывает, какие минералы (природные или искусственные химические соединения) и в каком количестве содержатся в каменном материале, вяжущем веществе и других композиционных составах. Например, известняк, мел состоят из одного минерала – кальцита, а мергель – из нескольких минералов. Зная минеральный состав, можно предопределить как физические, химические свойства, так и более специфические характеристики, такие как пластичность, огнеупорность, вязкость, способность к кристаллизации, скорость твердения, коррозионную стойкость. Например, по содержанию алита ($3CaO{\cdot}SiO_2$) в портландцементном клинкере (45…60 %) можно судить о скорости твердения и прочности цементного камня, по содержанию породообразующих минералов кварца и полевого шпата в гранитах об их твердости, хрупкости и способности к обработке.

Фазовый состав указывает на содержание в материале фаз, т. е. частей однородных по химическому составу и физическим свойствам и отделенных друг от друга поверхностями раздела. Если структуру составляют несколько фаз, то между ними заметна линия или граница раздела. Например, основными фазами раздела цементного клинкера являются алит, белит, алюминат и др. В пористом материале выделяют твердые вещества, образующие стенки пор, и сами поры, заполненные воздухом или водой. Если вода замерзнет в порах, то изменятся и свойства материала. Следовательно, фазовый состав материала и фазовые переходы воды в нем оказывают влияние на свойства и поведение материала при эксплуатации. Материалы, представленные одной фазой, называются *гомогенными*, а двумя и более – *гетерогенными*.

Если характеризовать состав композиционных материалов, то лучше говорить о ***вещественном составе***, поскольку они состоят из нескольких веществ, каждое из которых может иметь свой достаточно сложный химический и минеральный составы. Например, портландцемент кроме минералов клинкера содержит добавку гипса ($CaSO_4{\cdot}2H_2O$ – для регулирования сроков схватывания) и другие добавки. Содержание таких компонентов и есть вещественный состав.

Гранулометрический (зерновой) состав указывает на процентное содержание в сыпучей смеси зерен или гранул различных размеров и формы. При этом

размеры зерен могут подразделяться на группы (фракции). Поэтому различают *фракционный состав* – процентное содержание в сыпучем материале стандартных для него фракций (граничных размеров). Например, фракционный состав гравия составляет: фракции 5…10 мм – 26 %, 10…20 мм – 30 % и т. д.

Под ***структурой*** (от лат. *struktura* – строение) строительных материалов понимают совокупность устойчивых связей, обеспечивающих их целостность или внутреннее строение, обусловленное формой, размерами, взаимным расположением составляющих их частиц, пор, капилляров, микротрещин. Структура материала может в значительной степени влиять на его свойства и качественные показатели в целом. Например, горные породы известняк, мел и мрамор, имея одинаковый химический и минералогический составы, но различную внутреннюю структуру, по свойствам существенно отличаются друг от друга.

Различают макроструктуру (от греч. *macros* – большой), микроструктуру (*micros* – малый) материала и внутреннее строение на молекулярно-ионном уровне (наноструктуру). ***Макроструктура*** материала видима невооруженным глазом (визуально) или при небольшом увеличении (до 6 раз). При этом различают структуру поверхностного и внутреннего слоев. ***Микроструктура*** – это строение, видимое под микроскопом.

Макроструктура материала может быть однородной и неоднородной, зернистой (конгломератной или рыхлозернистой), ячеистой (мелко-, средне и крупнопористой), волокнистой, слоистой и др. Материалы, состоящие из отдельных, не связанных между собой зерен, образуют *рыхлозернистую* структуру. Это песок, гравий, порошкообразные материалы, различные засыпки для тепло- и звукоизоляции.

Конгломератная структура – когда отдельные зерна надежно соединены между собой (бетоны, некоторые природные и керамические материалы). *Ячеистая структура* характерна для материалов, имеющих макро- и микропоры (пено- и газобетоны, газосиликаты, ячеистые пластмассы). *Волокнистую структуру* имеют материалы, у которых волокна расположены параллельно одно другому. При этом они обладают различными свойствами вдоль и поперек волокон, так называемые анизотропные материалы. Волокнистая структура присуща древесине, минераловатным изделиям. *Слоистую структуру* имеют листовые, рулонные и плитные материалы (текстолит, бумажнослоистый пластик, глинистые сланцы и др.).

В зависимости от порядка расположения атомов и молекул материалы могут иметь строго упорядоченное строение – кристаллическое и неупорядоченное, хаотическое – аморфное. *Кристаллическая структура* образуется при очень медленном охлаждении расплавов, когда элементарные частицы (ионы, атомы, молекулы), из которых они составлены, имеют возможность перемещаться в пространстве и занимать наиболее устойчивое положение. Линии, условно проведенные через центры атомов в трех направлениях в таких структурах, являются прямыми и образуют так называемую кристаллическую решетку. Поэтому кристаллическими называют материалы, в которых атомы и молекулы расположены в правильном геометрическом порядке в трехмерном пространстве и образуют кристаллическую решетку. Примером может служить металл, гранит, мрамор и др.

Аморфная (бесформенная) *структура* образуется при быстром охлаждении расплавов, когда атомы при переходе в твердое состояние не успевают образовать кристаллическую решетку, а остаются вблизи тех положений, которые занимали в расплаве. Поэтому аморфными называют материалы, в которых атомы и молекулы расположены беспорядочно (хаотически). Однако аморфная структура не является совершенно беспорядочной. Некое подобие порядка наблюдается в ближайшем окружении атомов. Кроме того, в отличие от кристаллического состояния веществ, аморфное является термодинамически неустойчивым (метастабильным). При определенных условиях (температура, давление, время) аморфные материалы могут перейти в кристаллические. Примером может служить система «*стекло – ситалл*». По прошествии некоторого времени аморфные вещества тоже переходят в кристаллические. Однако время это может быть весьма значительным и измеряться годами и десятилетиями.

Часто кристаллическая и аморфная формы микроструктуры могут характеризовать лишь различное состояние одного и того же вещества (кристаллический кварц и аморфный кремнезем). При этом кристаллическая форма всегда более устойчивая. Например, чтобы вызвать химическое взаимодействие между кварцевым песком и известью в производстве силикатных изделий, необходимо применить автоклавную обработку в среде насыщенного пара при повышенной температуре (175 °С) и давлении (0,8 МПа). В то же время диатомиты и трепелы (аморфная форма диоксида кремнезема) взаимодействуют с известью и водой при нормальной температуре (15 °С) и давлении.

Различие между аморфными и кристаллическими материалами еще в том, что кристаллические материалы при нагревании имеют определенную температуру плавления, которая равна температуре отвердевания. Аморфные материалы при нагревании размягчаются и постепенно переходят в жидкое состояние. Кроме того, прочность аморфных материалов, как правило, ниже кристаллических. Поэтому иногда для получения более высокой прочности аморфного материала специально проводят его кристаллизацию. Тот же пример с ситаллами и шлакоситаллами.

Аморфный материал, как правило, изотропный. Кристаллический – в микрообъеме может быть анизотропный, в макрообъеме, когда кристаллы расположены хаотически (гранит), – изотропны. Аморфные вещества могут быть прозрачны, так как не имеют границ между кристаллами, рассеивающих световые волны. Поэтому аморфные вещества называют еще стеклянными, а их структуру – стеклообразной, как частный случай аморфной.

1.2. Структурно-физические свойства

Структурно-физические свойства строительных материалов определяются параметрами их физического состояния и структуры. Они характеризуют вещество и структуру материала как физического тела, а также способность реагировать на внешние воздействия, не вызывающие изменения их химического состава и структуры.

Плотность – свойство материала, количественно характеризующее отношение его массы к объему, т. е. масса единицы объема материала:

$$\rho = \frac{m}{V},$$

где m – масса, кг (г);

V – объем, м^3 (см^3).

Размерность плотности – кг/м^3 или г/см^3, т/м^3, кг/л.

Плотностью близкой к теоретической (максимальной) обладают металлы, жидкости, стекло, некоторые полимеры и пластмассы. Однако большинство строительных материалов в большей или меньшей степени имеют пористое строение, т. е. помимо твердого вещества в нем находятся ячейки (поры), заполненные воздухом или водой. Плотность таких материалов ниже плотности твердого вещества. Поэтому различают истинную, среднюю и насыпную (для сыпучих или зернистых материалов) плотность, а также плотность зерен сыпучих материалов (чаще всего крупных заполнителей для бетона). Для лучшего усвоения и более глубокого физического понимания, плотность строительных материалов часто сравнивают с плотностью воды, равной 1,0 г/см^3 при 4 °С.

Истинная плотность $\rho_и$ или плотность вещества (абсолютная плотность) – масса единицы объема материала m в абсолютно плотном состоянии V_A. Это значит, что при измерении объема в него не входят поры, пустоты, трещины и другие полости, присущие материалу в естественном состоянии:

$$\rho_и = \frac{m}{V_A}.$$

Следовательно, истинная плотность – это характеристика не материала, а вещества, из которого состоит материал, и обозначить ее можно как массу единицы суммарного объема твердой фазы в материале. Для определения истинной плотности, материал предварительно измельчают в тонкий порошок до тонкости 0,25 мм, чтобы при определении объема исключить поры. Масса порошка определяется взвешиванием, а объем в абсолютно плотном состоянии (V_A) – в пикнометре или приборе Ле Шателье по объему вытесненной жидкости.

Истинная плотность материала – характеристика постоянная (физическая константа), которая не может быть изменена без изменения его химического состава или молекулярной структуры. Для большинства строительных материалов значение истинной плотности более 1 г/см^3. Например, для природных и искусственных каменных материалов – 2,2…3,3 г/см^3; для органических (дерево, битум, пластмассы) – 0,8…1,6 г/см^3; черных металлов – более 7,0 г/см^3. Для жидкостей и материалов, полученных из расплавленных масс (металл, стекло, некоторые горные породы: гранит, базальт и др.), истинная плотность практически соответствует их плотности в естественном состоянии, так как объем внутренних пор у них незначителен.

Для строительных материалов истинная плотность имеет вспомогательное значение. Ее используют при вычислении показателей плотности и пористости материалов, в расчетах состава бетона и т. п.

Средняя плотность ρ_c (плотность материала, кажущаяся или условная плотность) – масса единицы объема материала в естественном состоянии, т. е. объем материала измеряется вместе с имеющимися в нем порами и пустотами. Рассчитывается средняя плотность путем деления массы образца m на его объем V_E

$$\rho_c = \frac{m}{V_E}.$$

При определении средней плотности объем материала устанавливают по внешним размерам образца или по объему вытесненной им жидкости, если испытываемый образец имеет неправильную форму.

Средняя плотность материалов не является величиной постоянной и в зависимости от их вида и структуры может изменяться в достаточно широких пределах – от 10 кг/м^3 (для отдельных видов пенопластов, мипоры и др.) до 7850 кг/м^3 (сталь) и более. Численное значение средней плотности для одного и того же вида материала может быть тоже различным в зависимости от количества пор и пустот в нем, т. е. изменяя структуру и пористость, можно получать материалы требуемой плотности. Например, с изменением пористости плотность ячеистых бетонов может изменяться в пределах от 350 до 1200 кг/м^3, керамического кирпича – от 1200 до 1900 кг/м^3.

У подавляющего большинства строительных материалов (пористых) величина средней плотности всегда меньше истинной, так как на одну и ту же единицу массы приходится больший объем. Например, у кирпича– соответственно 1800 и 2600 кг/м^3 (в 1,5 раза меньше), древесины (сосна) – 450 и 1540 кг/м^3 (в 3 раза меньше), гранита – 2500…2700 кг/м^3 и 2700…3000 кг/м^3, т. е. почти одинакова. Разница между ними тем больше, чем больше пористость. Если у кирпича пористость составляет 30 %, то у газобетона – 80 %, при истинной плотности 2600 кг/м^3 и средней – 500 кг/м^3.

Численные значения средней и истинной плотности вещества совпадают, когда материал не имеет пор, т. е. для абсолютно плотных материалов. Например, металл, стекло и др. Для сравнения в таблице 1.1 приведены значения истинной и средней плотности отдельных видов строительных материалов.

В большинстве своем (за исключением кварца, металлов, стекла и битума) материалы имеют пористое строение. Воздух, находящийся в порах материала, значительно хуже проводит тепло, чем твердое вещество. Поэтому по численному значению средней плотности можно в первом приближении судить о теплопроводности материала. Хотя при строительстве отапливаемых зданий толщина их наружных стен рассчитывается в зависимости от теплопроводности материала, но, зная плотность материала, можно приблизительно представить себе, какой должна быть толщина стены.

На среднюю плотность влияет содержание воды в материале, т. е. влажность материала. С увеличением влажности средняя плотность материала увеличивается. Например, средняя плотность сухой древесины (сосны) составляет 450 кг/м^3, а влажной может достигать 1000 кг/м^3.

Средняя плотность является необходимой характеристикой при расчете прочности сооружений с учетом собственной массы, для определения стоимости

и способа перевозок материалов, для расчета складов и подъемно-транспортного оборудования, при переводе количества материала из массовых единиц в объемные, при расчете пористости, при подборе состава бетона, дозировке материалов в бетон и т. д.

Таблица 1.1

Значения плотности некоторых строительных материалов

Материал	Плотность, кг/м^3	
	истинная	средняя (насыпная)
Сталь	7850…7900	7800…7850
Гранит	2700…2800	2600…2700
Мрамор	2700…2730	2600…2700
Бетон: тяжелый	2600…2900	2200…2500
ячеистый	2500…2600	350…1200
Кирпич: полнотелый	2600…2700	1700…1900
пустотелый	2600…2700	1450…1600
Древесина: сосны	1540	450…500
дуба	1540	750
Пенополистирол	1000…1200	50…150
Песок	2500…2600	(1500…1700)
Гравий	2500…2600	(1500…1700)
Щебень	2600…2700	(1350…1450)
Керамзит	2650	350…600
Цемент	3050…3150	(900…1300)
Пеностекло	2500	200…400

Для некоторых строительных материалов (теплоизоляционных, легких бетонов) средняя плотность является определяющей характеристикой деления их на марки. Например, марка ячеистого бетона D400 показывает, что среднее значение плотности не превышает 400 кг/м^3. Керамические и силикатные стеновые изделия в зависимости от показателя средней плотности подразделяются на классы 0,7; 0,8; 1,0…2,4, а в зависимости от класса средней плотности на пять групп эффективности по теплотехническим характеристикам: от малоэффективных до высокой эффективности. Например, для класса 1,0 средняя плотность материала должна составлять 900…1000 кг/м^3, а для класса 1,2 – 1001…1200 и т. д.

Для сыпучих или зернистых материалов (заполнителей для бетона) характеристикой плотности являются насыпная плотность и плотность зерен. *Насыпная плотность* – отношение массы рыхло насыпанных зернистых и порошкообразных материалов ко всему занимаемому ими объему, включая поры в зернах и объем пустот между зернами, так называемую *межзерновую пустотность*. Определяется в стандартных мерных сосудах, выбор объема (вместимости) которых зависит от вида и величины зерен сыпучего материала.

Насыпная плотность сыпучих материалов – величина не постоянная и зависит не только от пористости самих зерен и межзерновой пустотности, но и от степени их уплотнения и влажности. В уплотненном состоянии насыпная плот-

ность таких материалов всегда больше, чем в рыхлонасыпном, с повышением влажности плотность их (за исключением песка) тоже повышается.

Плотность зерен заполнителя – отношение массы пробы сухого заполнителя к суммарному объему его зерен, т. е. без объема межзерновых пустот, но с учетом пор, содержащихся в зернах заполнителя. Например, истинная плотность гранитного щебня составляет 2700 кг/м^3, плотность зерен – 2600 кг/м^3, а насыпная плотность – 1450 кг/м^3.

При определении плотности зерен заполнителя их объем устанавливается путем гидростатического взвешивания навески заполнителя. Методика гидростатического взвешивания основана на законе Архимеда, согласно которому на погруженное в жидкость тело действует выталкивающая сила, равная массе жидкости в объеме тела.

Для измерения плотности зерен крупного заполнителя определенное количество заполнителя последовательно взвешивают в воздухе и в жидкости известной плотности (например, в воде). По результатам этих взвешиваний определяют массу и объем зерен заполнителя, а, следовательно, и их плотность.

Отношение средней плотности материала к истинной $\left(\frac{\rho_c}{\rho_u}\right)$ – называют *показателем плотности* или *относительной плотностью*. Выражается в долях единицы или в процентах от объема материала, т. е. показывает степень заполнения объема материала плотным веществом. Чем меньше разность между численными значениями средней и истинной плотности, тем выше значение показателя плотности материала. Например, для кирпича: $\frac{1800}{2600} = 0,7$ или 70 %, для гранита: $\frac{2600}{2700} = 0,97$ или 97 %.

Для абсолютно плотных материалов показатель плотности равен 1,0 или 100 %.

Пористость и пустотность. Величина обратная показателю плотности есть показатель пористости (далее пористость). Следовательно, *пористостью* называют совокупность пор и трещин в единице объема материала, заполненных или не заполненных жидкой или газообразной фазой. Пористость дополняет показатель плотности до единицы или 100 % и указывает на степень заполнения объема материала порами. Различают общую, открытую и закрытую пористость.

Общую пористость рассчитывают по величине их истинной и средней плотности. Если принять общий объем материала за единицу или за 100 %, то разность между единицей и показателем плотности будет выражать собой численное значение пористости (***П***)

$$П = \left(1 - \frac{\rho_C}{\rho_И}\right) \cdot 100\%.$$

Из формулы видно, что чем меньше средняя плотность материала, тем больше его пористость. *Открытая пористость* определяется как суммарный

объем пор, сообщающихся с окружающей средой, а *закрытая* – суммарным объемом пор, находящихся внутри материала. Различают также макропористость (поры размером более 1 мм), капиллярную (1 мкм…1 мм), контракционную (от 50 Å и ниже) и гелевую.

Понятие «пустотность» по физическому смыслу сродни понятию «пористость». Однако на практике принято считать, что *поры* (от греч. *poros* – пора, отверстие) – это мелкие ячейки в материале размером, как правило, до 2 мм, а более 2 мм (технологические пустоты), а также воздушные полости и промежутки между зернами сыпучего материала принято называть *пустотами*. Поэтому пористость не следует отождествлять с понятием «пустотность», которая, например, в пустотелом кирпиче или между зернами заполнителя составляет соответственно 15…50 % и 35…45 %. Следовательно, порами можно считать все элементы его структуры, не занятые твердыми фазами исходных компонентов и новообразований.

Пористость строительных материалов колеблется в довольно широких пределах – от 0 % до 90 % и более. Например, для стекла и металла пористость составляет практически 0 %, пенопластов – 92…98 %, кирпича полнотелого – 30…35 %, пенобетона – 60…80 %, минеральной ваты – до 95 % и древесины – 50…75 %. По показателям пористости различают низкопористые ($\boldsymbol{П} \leq 30$ %), среднепористые ($\boldsymbol{П} = 30…50$ %) и высокопористые ($\boldsymbol{П} > 50$ %) материалы.

Большое влияние на свойства материала оказывает не только общая величина пористости, но и геометрическая и структурная характеристики пор. Поры в материалах могут быть крупные и мелкие; открытые, закрытые и сообщающиеся; в виде ячеек и капилляров и др. Поры могут быть заполнены воздухом, во влажном состоянии – водой, при отрицательных температурах – льдом. С теплозащитной точки зрения лучше мелкие, замкнутые поры и равномерно распределенные по всему объему материала.

Пористость, пустотность и плотность являются важными характеристиками строительных материалов. С ними связаны такие свойства строительных материалов как прочность, теплопроводность, водопоглощение, влажность, водопроницаемость, морозостойкость, кислотостойкость и др.

Дисперсность (от лат. *dispersus* – рассеянный, рассыпанный) означает рассеянность, раздробленность вещества и характеризует размер твердых частиц и капель жидкости. Понятие дисперсности простирается на широкую область размеров – от больших, чем простые молекулы, до видимых невооруженным глазом, т. е. от 10^{-7} до 10^{-2} см.

По мере роста дисперсности (измельчении твердого тела) увеличивается его суммарная или *удельная поверхность* при неизменном суммарном объеме и массе. При этом количественные изменения приводят к возникновению нового качества, поскольку дисперсные частицы обладают более интенсивной окраской, большей прочностью, твердостью и активностью, чем крупные частицы того же вещества. Например, увеличение тонкости помола цемента на 1 тыс. см^2 увеличивает его прочность (активность) примерно на 10 МПа.

С физико-химической точки зрения важнейшим следствием увеличения дисперсности является возрастание удельной реакционной способности твердых

тел, называемой часто *химической активностью*. Подтверждением этому служит известный факт, согласно которому многие вещества, практически не растворимые, заметно растворяются в дисперсном состоянии.

Многие строительные материалы (глины, гипсовые вяжущие, цемент, пигменты) находятся в тонкоизмельченном (дисперсном) состоянии и обладают большой суммарной поверхностью частиц. Величина, характеризующая степень раздробленности материала и развитости его поверхности, называется *удельной поверхностью* – суммарной поверхностью всех частиц единицы массы вещества (материала).

При этом физико-химические свойства поверхностного слоя дисперсных частиц сильно отличаются от свойств этого же вещества в массе. Причина в том, что атомы (молекулы) вещества, находящиеся внутри материала, уравновешены действием окружающих атомов (молекул), в то время как атомы (молекулы) на поверхности вещества находятся в неуравновешенном состоянии и обладают особым запасом энергии. С увеличением же удельной поверхности вещества возрастает его химическая активность. Например, цемент с удельной поверхностью 3000…3500 см^2/г через 1 сут. твердения связывает 10…13 % воды, а с удельной поверхностью 4500…5000 см^2/г – около 18 %.

1.3. Гидрофизические свойства

Гидрофизические свойства характеризуют поведение материалов и условия их хранения и эксплуатации при воздействии влаги и водяных паров, содержащихся в воздухе**.** Влага, проникающая в строительные материалы и изделия, в отдельных случаях может оказывать благоприятное воздействие на процессы, происходящие в их структуре, например, при твердении бетонов и строительных растворов. Однако в большинстве случаев вода оказывается одной из основных причин разрушения и ухудшения их теплозащитных и других свойств.

Водопоглощение – способность материала впитывать и удерживать в порах (пустотах) влагу при непосредственном контакте с водой. Характеризуется количеством воды, которую поглощает сухой материал при полном погружении и выдерживании в воде заданный промежуток времени, отнесенным к массе сухого материала (*водопоглощение по массе* $W_м$) или к объему материала в сухом состоянии (*водопоглощение по объему* $W_{об}$). Водопоглощение по объему и по массе выражают относительным числом или в процентах и вычисляют по формулам:

$$W_м = \frac{m_н - m_с}{m_с} \cdot 100\ \%,$$

$$W_{об} = \frac{m_н - m_с}{\rho_в \cdot V} \cdot 100\ \%,$$

где $m_с$ – масса сухого образца, г; $m_н$ – масса образца, насыщенного водой, г; $\rho_в$ – плотность воды, г/см^3; V – объем образца в сухом состоянии, см^3. Водопоглоще-

ние по массе показывает степень увеличения массы материала (за счет поглощенной воды), а водопоглощение по объему – степень заполнения объема материала водой. Водопоглощение по массе и по объему характеризует собой предельное состояние, когда материал больше не в состоянии поглощать влагу.

Отношение между водопоглощением по объему и по массе численно равно средней плотности материала, т. е. разделив почленно $W_{об}$ на $W_м$, получаем формулу для перехода от одного вида водопоглощения к другому

$$W_{об} = W_м \cdot \rho_c$$

Водопоглощение различных материалов колеблется в широких пределах. Например, водопоглощение по массе ситаллов и шлакоситаллов составляет 0 %, керамического гранита не превышает 0,05 %, натурального гранита – 0,02…0,5 %, тяжелого бетона – 3…8 %, керамического кирпича – 8…20 %, а пористых теплоизоляционных материалов может превышать 100 %.

Водопоглощение по объему является косвенной характеристикой открытой пористости, и поэтому иногда называют *кажущейся пористостью*. Однако пористость материалов по абсолютному значению всегда выше водопоглощения по объему, т. к. вода в обычных условиях не заполняет все поры. Водой заполняются только открытые (и то не все) поры, а стенки крупных пор только смачиваются водой. Поэтому водопоглощение по объему всегда меньше пористости, а следовательно, и меньше 100 %. Водопоглощение плотных материалов (сталь, стекло, битум) равно нулю.

Степень заполнения объема пор водой характеризуется ***коэффициентом насыщения***, т. е. отношением водопоглощения по объему к пористости материала:

$$K_{нас} = \frac{W_{об}}{П}.$$

Если учесть, что водопоглощение по объему всегда меньше пористости, то всегда $K_{нас} < 1{,}0$.

Насыщение материалов водой отрицательно влияет на их основные свойства:

- увеличиваются плотность материала, его теплопроводность, линейные размеры и объем;
- понижаются прочность, водостойкость, морозостойкость.

По величине коэффициента насыщения можно косвенно оценить морозостойкость материала. Чем меньше значение коэффициента насыщения, тем выше его морозостойкость. Материалы считаются морозостойкими при $K_{нас} < 0{,}6$.

В строительной практике принято считать, если $K_{нас} < 0{,}6$, материал морозостойкий, если $0{,}6 < K_{нас} < 0{,}8$, то материал имеет сомнительную морозостойкость, а если $K_{нас} > 0{,}8$ материал не морозостойкий. Объясняется это величиной заполнения пор водой – чем больше пор заполнено водой, тем больше вероятность разрушения материала после замерзания в порах воды.

Влажность. В реальных условиях эксплуатации строительных конструкций материал может содержать некоторое количество влаги, полученной при кратковременном увлажнении или гигроскопичности. В этом случае состояние материала характеризуют влажностью. Следовательно, *влажность* (влагосодер-

жание) характеризуется отношением массы влаги, содержащейся в парообразной, жидкой или твердой фазах в порах материала, к массе сухого материала (влажность материала по массе). Влажность материала выражают в процентах и вычисляют по формуле:

$$W = \frac{m_в - m_c}{m_c} \cdot 100\ \%,$$

где $m_в$ – масса влажного образца, г; m_c – масса сухого образца, г.

Теоретически влажность строительных материалов может изменяться от нуля, когда материал находится в абсолютно сухом состоянии, до величины, соответствующей полному водопоглощению материала по массе. Однако численное значение влажности, как правило, всегда будет меньше водопоглощения по массе. В естественных же условиях эксплуатации материалы в сооружениях находятся преимущественно в воздушно-сухом состоянии, т. е. при установлении равновесия между влажностью материала и окружающего его воздуха. При этом различают фактическую, нормальную (равновесную) и нормированную влажность. При *равновесной влажности* материал не приобретает и не отдает влагу в окружающую среду.

Влажность нормируется для изделий, используемых в ограждающих конструкциях. Например, влажность легкого бетона в ограждающих конструкциях не должна превышать 13 % для жилых и 15 % – для производственных зданий, воздушно-сухой древесины – 12…18 %, молотого мела – 5…7 %.

Влага в материалах может находиться в различных агрегатных состояниях и иметь различные формы связи с материалом. Различают влагу в материалах:

- поверхностную – находящуюся на поверхности материала и в крупных порах;
- капиллярную, которая заполняет капилляры, субкапилляры и мелкие поры материала и удерживается в них капиллярными силами;
- адсорбционную – поглощаемую из воздуха поверхностью частиц строительного материала (зависит от влажности окружающей среды, степени дисперсности материала и адсорбционных свойств);
- гидратную (кристаллическую), которая входит в состав кристаллов, например в гипсовом камне – $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ (удаление кристаллической влаги приводит к изменению структуры минералов и разрушению кристаллов);
- затворения, набухания и др.

Увлажнение материалов в строительных конструкциях может происходить при их изготовлении (строительная влага), атмосферными осадками, конденсатом водяных паров из воздуха, утечкой воды из водопроводно-канализационных сетей и капиллярным подсосом грунтовой воды. При этом различные виды воды увлажнения тесно взаимосвязаны, и изменение интенсивности одного из них может существенно повлиять на другие свойства материалов в конструкциях. Например:

- капиллярный подсос влаги повышает теплопроводность стен зданий;
- вследствие повышенной теплопроводности происходит охлаждение внутренней поверхности;
- охлаждение внутренней поверхности приводит к увеличению количества конденсата.

Различают *эксплуатационную* (в процессе эксплуатации в ограждающих конструкциях зданий) и *расчетную* (эксплуатационная для обобщенных условий, принимаемая при определении расчетной теплопроводности) влажность.

Гигроскопичность – способность материала поглощать (сорбировать) и конденсировать (адсорбировать) водяные пары из воздуха до установления равновесия и удерживать их вследствие капиллярной конденсации, т. е. изменять свою влажность при изменении влажности воздуха. Характеризуется отношением массы поглощенной материалом влаги при относительной влажности воздуха 100 % и температуре 20 °С к массе сухого материала.

Гигроскопичность зависит от температуры воздуха; его относительной влажности; вида, количества и размера пор, а также от природы вещества. С увеличением относительной влажности и снижением температуры воздуха гигроскопичность повышается. Материалы с одинаковой пористостью, но имеющие более мелкие поры (а соответственно и большую поверхность), оказываются более гигроскопичными, чем крупнопористые материалы. Для сыпучих материалов гигроскопичность зависит от их дисперсности. Сам же процесс поглощения влаги называется *сорбцией*, а материалы, притягивающие своей поверхностью воду, называют *гидрофильными* (смачиваемыми водой).

Гигроскопичность и сорбция отрицательно сказываются на качестве строительных материалов, т. е. вызывают вредные последствия. С увеличением влажности материала увеличивается плотность, теплопроводность, уменьшается прочность и т. д. Цемент, например, при хранении, поглощая влагу, комкуется, теряет активность (прочность). Древесина от влажности разбухает, коробится, трескается и гниет.

Состояние материала, при котором прекращается увлажнение, называется равновесным, т. е. наступает *равновесное состояние сорбции*, а влажность материала после достижения им тепловлажностного равновесия с окружающим влажным воздухом называют *равновесной сорбционной влажностью*. Снизить гигроскопичность материала можно, если покрыть его поверхность гидрофобными (водоотталкивающими) веществами. Например, древесину покрывают водостойкими лаками, красками и т. д.

С гигроскопичностью связано такое понятие как – *капиллярная диффузия* (капиллярное всасывание, капиллярность от лат. *capillaries* – волосяной) – свойство пористо-капиллярных материалов поднимать воду по капиллярам или способность жидкости к течению по узким каналам против сил тяжести. При этом высота подъема воды зависит от размера пор (капилляров). Чем меньше диаметр капилляров, тем выше высота капиллярного поднятия. Капиллярная диффузия характеризуется высотой (уровнем) поднятия воды в капиллярах, либо количеством поглощенной воды, интенсивностью всасывания и др.

Если не приняты меры по гидроизоляции строительных конструкций, то это может быть поднятие, например, грунтовой воды по открытым капиллярам на значительную высоту. Теоретически максимальное значение высоты подъема воды в капилляре гидрофильного материала может составлять 15 м при радиусе пор 1 мкм (0,001 мм). Например, кирпич при отсутствии гидроизоляции может вымокнуть на высоту в несколько этажей до самой кровли. Поэтому для защиты конструкций от увлажнения в результате капиллярного всасывания необходимо тщательно изолировать материал от источника увлажнения с помощью гидроизоляционных материалов.

Влагоотдачей называют свойство материала отдавать влагу окружающей среде при соответствующих условиях (температура, давление, движение и изменение влажности воздуха и др.). Характеризуется количеством воды в процентах от массы стандартного образца, теряемом материалом в течение 1 сут. при относительной влажности воздуха 60 % и температуре 20 °С. Скорость влагоотдачи в значительной степени зависит от разности между влажностью материала и относительной влажностью воздуха. Процесс влагоотдачи или высыхания материала называется *десорбцией*. В естественных условиях эксплуатации зданий и сооружений влагоотдача происходит очень медленно, в течение продолжительного времени.

Вода испаряется до тех пор, пока не установится равновесие между влажностью материала конструкции и влажностью окружающего воздуха, т. е. пока материал не достигнет воздушно-сухого состояния. Такое состояние материала тоже называют *равновесным, т. е. равновесное состояние десорбции.* Однако на практике равновесное состояние сорбции, как правило, меньше, чем десорбции. Например, древесина, стремясь к равновесной влажности, практически ее не достигает, и фактическая влажность оказывается несколько большей при высыхании и меньшей – при увлажнении. Изотермы или графическое изображение между равновесным влагосодержанием материала и влажностью воздуха приведены на рис. 1.2.

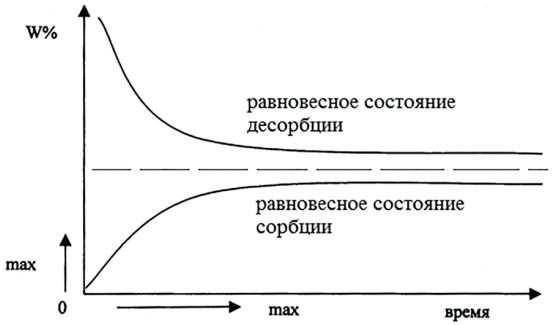

Рис. 1.2. Условные изотермы сорбции и десорбции

Влагоотдача имеет большое значение для стеновых материалов и изделий (в данном случае – это желанная влагоотдача, нежеланная – высыхание тверде-

ющего бетона). В обычных условиях, благодаря влагоотдаче стены и другие конструкции зданий и сооружений высыхают. По мере высыхания у многих материалов восстанавливаются их свойства – прочность, эластичность, теплопроводность и др.

Водопроницаемость – способность материала пропускать воду под давлением. Для одних материалов в зависимости от назначения характеристикой водопроницаемости служит количество воды, прошедшее в единицу времени через 1 м^2 поверхности материала при заданном давлении, для других (гидроизоляционных) – время контакта с водой, по истечении которого появляются первые признаки просачивания воды через испытываемый образец под определенным давлением и др.

Для некоторых материалов (например, гидротехнических бетонов) в зависимости от назначения оценкой водопроницаемости служит обратная характеристика – *водонепроницаемость*. По водонепроницаемости такие бетоны подразделяются на марки (W2, W4…W20). Численное значение марки выражает максимальное одностороннее гидростатическое давление (кгс/см^2 или 0,1 МПа) при котором стандартный образец не пропускает воду в условиях стандартных испытаний или наименьшее давление, при котором вода начинает проникать через образец. По ЕН 12390-8 характеристикой водонепроницаемости служит глубина проникновения воды через образец бетона под определенным давлением.

Водопроницаемость (водонепроницаемость) зависит от плотности и строения материала. Чем больше в материале пор и чем эти поры крупнее, тем больше водопроницаемость материала. К водонепроницаемым материалам относятся особо плотные – сталь, стекло, битум и др. Материалы с замкнутыми мелкими порами тоже практически водонепроницаемы.

Паропроницаемость – это свойства материала или наружного ограждения пропускать парообразную влагу через свою структуру под действием разности парциальных давлений водяного пара внутри и снаружи здания. Зависит от типа материала, его химической природы, структурных характеристик, температурно-влажностных и других параметров. Паропроницаемость является важной характеристикой для стеновых (ограждающих), кровельных (подкровельных), теплоизоляционных материалов и отражает их способность пропускать диффундирующий через себя пар в ту сторону, где его парциальное давление ниже (обычно из теплого помещения в холодное). В зависимости от конструкции ограждения и используемых материалов водяные пары могут либо беспрепятственно проходить через ограждение или накапливаться в нем, снижая эксплуатационные характеристики.

Особенностью паропроницаемости является то, что в зависимости от температуры пар способен изменять свое агрегатное состояние, т. е. конденсироваться (замерзать), вытесняя газовую фазу, и тем самым изменять свойства структуры. Поэтому для ряда конструкций паропроницаемость, как характеристика структуры, должна рассматриваться в двух аспектах:

- теплофизическом – решение проблемы создания надлежащих тепловлажностных параметров помещения;
- материаловедческом – защита структуры и конструкции в целом от разрушительного действия конденсата.

Для создания нормального микроклимата в жилом помещении стены должны обладать определенной проницаемостью, т. е. «дышать». В этом случае через наружные стены будет происходить *естественная вентиляция*, что особенно важно для жилых зданий, в которых отсутствует кондиционирование воздуха. Поэтому стены жилых домов, больниц и т. п. не отделывают материалами, задерживающими водяной пар.

И наоборот, стены и покрытия влажных производственных помещений необходимо защищать с внутренней стороны от проникновения водяного пара (теплоизоляция не должна отсыревать). Дело в том, что в зимнее время года внутри теплых помещений (дома быта, коровники и т. п.) содержится пара значительно больше, чем снаружи. Поэтому избыточный пар стремится выйти наружу через ограждение. Попадая в холодную часть ограждения, пар конденсируется и резко повышает влажность материала, в т. ч. и конструкции. Это создает условия для быстрого разрушения ограждения при замораживании и повышает теплопроводность, т. е. увеличиваются теплопотери, а также приводит к повышению влажности в помещении и появлению на внутренней поверхности стен плесени и грибков. Кроме того, считается, что уровень влажности в жилом помещении тоже всегда чуть выше, чем снаружи, и образующийся пар стремится выйти наружу. Влажными считаются условия, которые характеризуются влажностью материала, приведенной к температуре воздуха 20 °С и относительной влажности окружающего воздуха, превышающей 85 % в течение нескольких недель в году.

Следовательно, необходимая степень паропроницаемости (паронепроницаемости) конструкции достигается правильным выбором материалов, их взаимным расположением и решается в каждом конкретном случае индивидуально с использованием современных пароизоляционных материалов. При проектировании и строительстве зданий и сооружений необходимо обеспечивать паронепроницаемость стенового материала от теплой поверхности к холодной и предусматривать установку «барьеров» из пароизоляционных материалов и не допускать попадание пара и влаги в теплоизоляцию.

Паропроницаемость численно равна количеству водяного пара, *мг*, проходящего через слой материал или изделия площадью *1 м*^{2}, толщиной *1 м* за *1 час* при перепаде давления водяного пара между обеими сторонами образца *1 Па* и характеризуется коэффициентом паропроницаемости $\boldsymbol{\mu}$ (мю). Размерность мг/(м·ч·Па). Коэффициент паропроницаемости материала является расчетным теплотехническим показателем и определяется как отношение толщины образца материала к сопротивлению паропроницанию, измеренному при установившемся стационарном потоке водяного пара через этот образец.

Характеристика обратная проницаемости называется ***сопротивлением паропроницаемости R*** (м^2·ч·Па/мг) и показывает, какое сопротивление оказывает материал прохождению через него паров влаги. Характеризуется коэффициентом сопротивления паропроницанию $\boldsymbol{W_p}$, который указывает во сколько раз сопротивление диффузии водяного пара какого-либо материала больше сопротивления слоя неподвижного воздуха такой же толщины при таких же значениях температуры и давления и равен произведению коэффициента паропроницаемости μ на толщину однородного образца материала $\boldsymbol{\delta}$.

Характеристиками паропроницаемости материалов являются также скорость паропроницаемости, сравнительный коэффициент паропроницаемости, толщина слоя неподвижного воздуха с эквивалентной скоростью паропроницанию и др. При этом определение характеристик и их терминология в различных источниках зачастую носят весьма противоречивый характер.

Гидрофильность (от греч. «*hydro*» и «*phileo*» – любящий воду) и ***гидрофобность*** (от греч. «*hydro*» и «*phobos*» – боящийся воды) являются характеристиками интенсивности молекулярного взаимодействия поверхности веществ (материалов) с водой, т. е. способности их смачиваться водой. Гидрофильность и гидрофобность можно оценить по растеканию капли воды на гладкой поверхности тела. На гидрофильной поверхности капля растекается полностью, а на гидрофобной – лишь частично, причем величина краевого угла между поверхностями капли и смачиваемого тела зависит от того, насколько данное тело гидрофобное (рис. 1.3). Для гидрофильных материалов краевой угол острый, для гидрофобных – тупой.

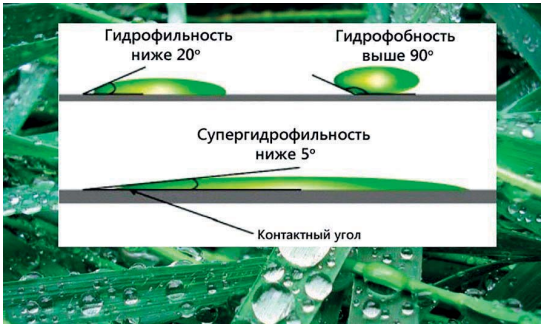

Рис. 1.3. Капли воды на гидрофильной и гидрофобной поверхности

Гидрофильностью (хорошей смачиваемостью водой) обладают вещества с ионными кристаллическими решетками (карбонаты, силикаты, сульфаты, глины), а также силикатные стекла. Гидрофильные материалы, имеющие мелкие поры и капиллярные каналы, например кирпич, при соприкосновении с водой способны поглощать ее и поднимать по капиллярам на значительную высоту.

Гидрофобностью (плохой смачиваемостью) обладают металлы, лишенные оксидных пленок, органические соединения с преобладанием углеводородных групп в молекуле (например, парафины, жиры, воски, некоторые пластмассы), графит, сера и вещества со слабым межмолекулярным взаимодействием. Убедительным примером гидрофобной поверхности является оперение водоплавающих птиц – покрытое жиром, оно абсолютно не намокает в воде.

Для снижения смачиваемости материалов и поглощения ими воды необходимо изменять характер их поверхности, т. е. обрабатывать водоотталкивающими веществами, например, гидрофобизирующей кремнийорганической жид-

костью (ГКЖ) и др. Поверхность, обработанная такими веществами (гидрофобизаторами), не поглощает воду и более того вода скатывается с их поверхности – «как с гуся вода».

1.4. Теплофизические свойства

В природе существуют три элементарных способа передачи теплоты: теплопроводность, конвекция и тепловое излучение (радиационный теплообмен).

Теплопроводность характеризует способность материала проводить тепло и представляет собой процесс распространения тепловой энергии при непосредственном соприкосновении отдельных частиц материала (за счет молекулярных колебаний в твердых телах и неподвижных жидкостях и газах), имеющих различные температуры. Применительно к строительной отрасли это означает перенос теплоты через ограждающую конструкцию от взаимодействующей с ней среды с более высокой температурой к среде с более низкой температурой другой стороны конструкции и обусловливает выравнивание температуры материала. Если обе среды или поверхности в ограждающей конструкции имеют одинаковые температуры, то они находятся в тепловом равновесии, и какой-либо теплообмен между ними не происходит. При наличии же разности температур происходит передача тепла из системы с более высокой температурой в систему с более низкой температурой до тех пор, пока не установится тепловое равновесие.

Происходит такой теплообмен, когда молекулы приводятся в возбужденное состояние тепловой энергией, поступающей от источника с одной из сторон материала. Тепло передается последовательно от одной молекулы к другой – холодной стороне материала. Поэтому теплопроводность осуществляется в условиях тесного соприкосновения между отдельными мельчайшими частицами материала (атомами, ионами, электронами, молекулами) и неравенства температур в отдельных точках, т. е. между неподвижными частицами твердого, жидкого или газообразного вещества. Однако в чистом виде теплопроводность встречается, как правило, только в твердых телах, так как в жидких и газообразных средах практически невозможно обеспечить неподвижность вещества.

Различные материалы проводят тепло по-разному. Хорошим проводником тепла является металл, средним – дерево и плохим – воздух. Если при строительстве зданий применять материалы, хорошо проводящие тепло, то потери тепла и, следовательно, расходуемая энергия будут велики.

Теплопроводность численно равна тепловому потоку, проходящему сквозь единицу поверхности, перпендикулярной направлению теплового потока, при градиенте температуры, равном единице температуры на единицу длины и соответствует термину «коэффициент теплопроводности», который тоже показывает, какое количество теплоты передается в единицу времени через единицу поверхности при температурном градиенте равном единице. Чем меньше теплопроводность, тем меньше потери тепла при одной и той же толщине материала и

одинаковых климатических условиях. Теплопроводность обозначают символом λ и выражают в Вт/(м·К).

Теплопроводность строительных материалов зависит от многих факторов, среди которых химический состав материала, атомно-молекулярное строение и структура, плотность, влажность, температура и другие, но во всех случаях теплопроводность материала во много раз превышает теплопроводность воздуха. Условный ряд веществ по мере возрастания их теплопроводности можно представить в следующем виде: газы [в пределах значений от 0,02 до 0,6 (воздух – 0,024)]; полимеры (полистирол – 0,084; полиэтилен – 0,34); жидкости [в пределах от 0,07 до 0,7 (вода – 0,58; лед – 2,32)]; стекла (силикатное – 0,75); кристаллы (кварц – 7…8, корунд – 30, графит – 180) и металлы (железо – 73,2; алюминий – 230; серебро – 425 Вт/(м·К)), т. е. теплопроводность воздуха почти в 18 тыс. раз ниже, чем у серебра. Самая высокая теплопроводность у графена (разновидность модификации углерода) – 3…5 тыс. Вт/(м·К).

Теплопроводность материалов уменьшается с увеличением их пористости. У пористых материалов тепловой поток проходит через их массу и поры, наполненные воздухом. Следовательно, теплопроводность пористых материалов имеет промежуточное значение между значениями теплопроводности их веществ и воздуха. Чем больше пористость, тем ниже теплопроводность и наоборот. Например, теплопроводность тяжелого бетона – 1,2…1,5; легкого бетона на пористых заполнителях – 0,3…0,7; пено- и газобетона – 0,2…0,4; древесины – 0,16…0.30; пенопласта – 0,04…0,06 Вт/(м·К). Однако при прочих равных условиях наименьшей теплопроводностью будет обладать материал, поры у которого мелкие, равномерно распределенные по всему объему и замкнутые.

С увеличением влажности материалов их теплопроводность увеличивается, потому что при увлажнении происходит вытеснение сухого воздуха из пор материала и замещение его водой или влажным воздухом, теплопроводность которых значительно выше. Наглядно это можно проследить на примере материала, поры у которого могут быть заполнены воздухом, водой или льдом: теплопроводность воздуха – 0,024, воды – 0,56, а льда – 2,2 Вт/(м·К). Во втором случае теплопроводность увеличивается в 23 раза, а в третьем – в 90 раз. Либо на примере керамического полнотелого кирпича в сухом, в условиях равновесной влажности и во влажном состоянии. Теплопроводность такого кирпича соответственно будет составлять – 0,56; 0,7 и 0,81 Вт/(м·К). Следовательно, увлажнение строительных конструкций (в т. ч. ограждающих) приводит к снижению их теплозащитных качеств, приводя к увеличению теплопроводности влажного материала.

Знать теплопроводность необходимо при теплотехнических расчетах стен, перекрытий, тепловой изоляции трубопроводов. Чем меньше теплопроводность материала, тем меньше толщина ограждения, а, следовательно, меньше затрачивается материала на единицу его площади. Теплопроводность является также определяющей характеристикой качества теплоизоляционных материалов, у которых теплопроводность должна быть не более 0,175 Вт/(м·К). Однако в действительности считается не более 0,065 Вт/(м·К). В большинстве случаев теплопроводность теплоизоляционных материалов определяется опытным путем.