

## Оглавление

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	7
Глава 1. ТЕПЛОВАЯ ИЗОЛЯЦИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ .....	9
1.1. Тепловая изоляция в системах централизованного теплоснабжения.....	9
1.2. Теплозащита ограждающих конструкций .....	13
Глава 2. ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ ГАЗОНАПОЛНЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ .....	15
2.1. Структура и свойства газонаполненных материалов.....	15
2.2. Газонаполненные фенольные и карбамидные полимеры .....	21
2.3. Теплоизоляционные материалы на основе наполненных пенополиуретанов .....	62
2.4. Теплоизоляционные материалы на основе вспененного полиэтилена .....	74
2.5. Теплоизоляционные материалы на основе вспененного полистирола .....	76
2.6. Теплоизоляционные материалы на основе вспененного каучука.....	79
2.7. Теплоизоляционные материалы на основе аэрогеля.....	82
2.8. Теплоизоляционные материалы на основе ячеистого стекла .....	86
2.9. Теплоизоляционные волокнистые материалы.....	88
Глава 3. МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА ИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И СИСТЕМ.....	97
3.1. Модельные структуры газонаполненной теплоизоляции .....	97
3.2. Процессы тепломассопереноса и методы расчета теплоизоляционных конструкций .....	114
3.3. Расчет теплообмена в теплоизоляционных конструкциях.....	149
Глава 4. СИСТЕМЫ ИЗОЛЯЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ .....	166
4.1. Системы изоляции с применением газонаполненных пластмасс .....	166
4.2. Системы с применением минераловолокнистой теплоизоляции .....	170
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	179
Библиографический список .....	180

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Системы технической изоляции технологических объектов являются обязательными компонентами общей инженерной системы изоляции, которые, как и задачи совершенствования подобных систем, всегда сохраняют актуальность. Необходимость таких систем, во-первых, обусловлена обеспечением реализации параметров технологических процессов и технологических циклов, а также, как следствие соблюдения технологических режимов, — качества продукции. Во-вторых, системы изоляции (теплоизоляции в том числе) являются фактором теплосбережения, а по отношению к продукции — энергосбережения. В-третьих, хорошо спроектированные и правильно реализованные системы изоляции обеспечивают комфортные климатические условия в помещениях, их соответствие требованиям охраны труда, а также способствуют снижению нагрузки на окружающую среду и повышают экологичность технологических процессов.

Очевидно, что вопросами тепловой изоляции занимались и продолжают заниматься ученые сообщества во многих странах, научно-исследовательские организации и научные подразделения фирм. Хотелось бы отметить следующие организации: Институт исследований в области строительства (Канада); фирму Holometrix (США); НИИ теплоизоляции Вильнюсского технического университета им. Гедиминаса (ВГТУ) (Литва); НИИ строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН) (Россия); Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций имени В.А. Кучеренко (ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко) (Россия); Центральный научно-исследовательский и проектный институт жилых и общественных зданий (ЦНИИЭП жилища) (Россия); ОАО «НИИМосстрой» (Россия); Научный центр по комплексным транспортным проблемам Министерства транспорта Российской Федерации (НИЦ Минтранса России) (Россия); НИЦ «Физтех» (Россия); Институт физико-технических измерений (Россия).

Большая работа проводится научными подразделениями компаний «ПАТЕК», «РОК-ВУЛ», «ТехноНИКОЛЬ», «Тепофол», «Ролз Изомаркет», «ПЕНОПЛЭКС», «ЛИТ» и рядом других. В работе принимают участие структуры Минстроя России, а также ученые Российской академии архитектуры и строительных наук и Российской инженерной академии (РИА), научные подразделения таких вузов, как Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ), Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова), Воронежский государственный технический университет (ВГТУ) и др.

Огромная работа в области технической изоляции была проделана следующими институтами: Всесоюзный научно-исследовательский институт по монтажным и специальным строительным работам (НИИ 200, ВНИИмонтажспецстрой), ОАО «ТЕПЛОПРОЕКТ (ВНИПИТеплопроект)», УралНИИСтромпроект, ООО «ВНИИСтром-НВ», НИИТеплоизоляция и рядом других, в настоящее время прекративших свое существование.

В монографии при разработке теоретических основ проектирования и методов расчета тепло- и влагообменных процессов в конструкциях промышленной тепловой изоляции использованы научно обоснованные представления о взаимосвязи структуры и свойств газонаполненных материалов, о механизме совместного тепло- и массообмена в капиллярно-пористых телах, результаты теоретических и экспериментальных исследований физико-механических свойств теплостойких вспененных пластмасс и некоторых типов пористоволокнистых изделий, а также процессов тепло- и влагопереноса в теплоизоляционных материалах и конструкциях, полученные с участием авторов в НИУ МГСУ, институтах ВНИПИТеплопроект и ЦНИИСК им. Кучеренко.

Эффективность систем изоляции базируется на реализации следующих групп задач: научно-обоснованном проектировании систем изоляции и корректном выполнении строительных и монтажных работ. Это предполагает наличие как нормативной базы современного уровня, подготовки специалистов строителей и монтажников, так и подготовку соответствующей учебной и научной литературы. Значительный вклад в эту работу вносят учебные центры и службы технической поддержки фирм – производителей изоляционных материалов и разработчиков систем изоляции, а также научные и образовательные подразделения высших и средних специальных учебных заведений.

Монография ориентирована на решение следующих задач: изложение сведений об эффективных изоляционных материалах, используемых в технической изоляции, научных основ проектирования и расчета, а также основных системных решений. Авторы выражают благодарность бакалаврам строительства Е.А. Медниковой и М.А. Бурцевой за помощь в работе над рукописью.

## ВВЕДЕНИЕ

Тепловая изоляция промышленного оборудования и технологических объектов направлена на решение трех групп задач. Во-первых, это — создание условий для качественного обеспечения технологических параметров процессов. Во-вторых, это — энергосбережение или оптимизированное использование энергетических ресурсов. В-третьих, это — обеспечение условий труда на уровне действующих санитарных норм. В-четвертых, это — снижение отрицательной нагрузки на окружающую среду [4, 91]. Важным также является повышение долговечности систем изоляции, что зависит и от разработки современных проектных решений и систем расчета, использования материалов, имеющих высокую эксплуатационную стойкость, и профессионального монтажа систем изоляции.

Обеспечение технологического уровня предполагает индивидуальный подход, зависящий от функционального предназначения того или иного типа оборудования. Например, для тепловых установок (сушилок, печей) изоляция позволяет как снизить затраты на получение продукта, обеспечить его качество, создавать в помещениях приемлемый температурный режим, так и уменьшить количество вредных выбросов (дымовые газы и пр.) в окружающую среду. Изоляция трубопроводов горячего водоснабжения или паропроводов, с одной стороны, способствует организации доставки продукта с требуемой температурой, а с другой стороны, обеспечивает энергетическую эффективность процессов. Изоляция холодильников или установок глубокого холода (например, сжиженного газа) позволяет поддерживать состояние продукта на требуемом уровне и также обеспечивает энергетическую эффективность. Изоляция систем трубопроводов транспортировки нефти предполагает поддержание температуры в трубопроводах, обеспечивающей оптимальные условия перекачки и т.п.

Проблемам энергосбережения и энергетической эффективности уделяется весьма пристальное внимание [1, 2]. Согласно целевым установкам к 2030 г. предполагается достижение показателя по экономии топлива в размере 500–600 млн т у.т., что, в свою очередь, позволит снизить выбросы в атмосферу вредных веществ до 30–40 %, а также оптимизировать выбросы газов и химических веществ, ужесточающих парниковый эффект.

Следует отметить, что отечественные теплотехнические нормативы после 1990 г. претерпели значительное изменение. Так, требования по нормативному термическому сопротивлению ограждающих конструкций (стен, кровли, полов по грунту) увеличились в 2,5–3 раза. В соответствии с действующими нормативами и стандартами были существенно снижены нормы плотности теплового потока через изолируемые поверхности оборудования и трубопроводов [90, 93].

Это повлекло за собой необходимость разработки современных систем изоляции на основе высокоэффективных теплоизоляционных материалов. Аналогичная ситуация складывалась и в области систем тепловой изоляции, реализуемых во всех областях промышленного производства и строительства. Только повышение теплозащитных свойств изоляционных оболочек промышленных сооружений, оборудования и трубопроводов, теплопроводов, систем централизованного теплоснабжения и ограждений зданий позволяет обеспечивать значительную экономию энергетических ресурсов. Величина такой экономии в масштабах страны находится на уровне 40 млн т у.т.

Роль тепловой изоляции при решении задач повышения энергетической эффективности включает в себя два аспекта этой проблемы. С одной стороны, это — учет нормативных потерь, а с другой стороны, это — анализ возникновения и обязательный мониторинг сверхнормативных потерь. Общие потери тепла объектами строительного комплекса (через ограждающие конструкции промышленных сооружений, через изоляцию теплопроводов и т.п.) по приблизительным оценкам составляют 364,5 млн т у.т./г. Этот показатель снижается за счет применения современных методов проектирования и внедрения высокоэффективных изоляционных систем.

Сверхнормативные потери связаны, в первую очередь, с условиями эксплуатации изоляционных конструкций. К объективным причинам таких потерь относятся высокая интенсивность как тепловых влажностных и механических воздействий окружающей среды, ее возможная агрессивность, так и отрицательные воздействия на системы изоляции самих технологических процессов. Субъективные причины обусловлены необоснованным выбором теплоизоляционных материалов (без учета особенностей эксплуатации), недостаточным качеством проектирования и методов монтажа. Все это приводит к значительным сверхнормативным потерям тепла, которые могут превышать расчетные (нормативные) в 1,2–1,8 раз [77, 96].

Практика показывает, что увеличение сверхнормативных потерь тепла происходит постепенно в процессе эксплуатации за счет, в первую очередь, деградации свойств теплоизоляционных материалов как элемента, обладающего наименьшей эксплуатационной стойкостью по сравнению с другими компонентами системы изоляции. Это оказывает также непосредственное влияние на долговечность системы изоляции и безремонтный срок ее эксплуатации.

В связи с этим для повышения энергетической эффективности и обеспечения безремонтного нормативного цикла службы промышленной изоляции необходима подготовка специальных кадров как рабочих, так и инженеров. С учетом того, что системы изоляции технологического оборудования и технических объектов работают в условиях интенсивных тепловых, влажностных и агрессивных воздействий окружающей среды и технологических процессов, необходима специальная подготовка инженерных работников и формирование у инженеров, проектирующих теплоизоляцию, ясных представлений об особенностях строения и основных физико-технических свойствах теплоизоляционных материалов, о физической природе и механизме тепло- и влагообмена в теплоизоляционных конструкциях и создание расчетных методов оценки агрессивности условий эксплуатации и их влияния на свойства теплоизоляционных конструкций промышленных сооружений, оборудования и трубопроводов.

# Глава 1

## ТЕПЛОВАЯ ИЗОЛЯЦИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ

### 1.1. Тепловая изоляция в системах централизованного теплоснабжения

Установки для генерации тепла можно условно разделить на две группы: системы индивидуального и централизованного теплоснабжения. Системы индивидуального теплоснабжения характерны для многих стран и предполагают ответственность за все процессы непосредственно собственников жилья. В России подобные системы применяются для индивидуального строительства и коттеджных поселков, и их основным достоинством является минимизация расстояний от устройств получения тепла до его доставки в узлы эксплуатации (как правило, котел размещается непосредственно в коттедже или рядом с ним) [79, 82].

Исторически в России сложилась такая ситуация, когда в системе централизованного теплоснабжения расстояние между теплогенерирующими комплексами (например, теплоэлектростанциями) и потребителем (единицей городской застройки) может исчисляться километрами. Россия является одним из пионеров в области централизованного теплоснабжения, а система централизованного теплоснабжения — крупнейшей в мире. При этом тепловые сети представляют собой один из наиболее энергоемких элементов всех видов энергетического технологического оборудования. Отсталость оборудования и технологических решений в техническом уровне прокладок тепловых сетей [54, 76, 78] приводит к значительным потерям тепла, которые увеличиваются пропорционально длине тепловых сетей (рис. 1.1).

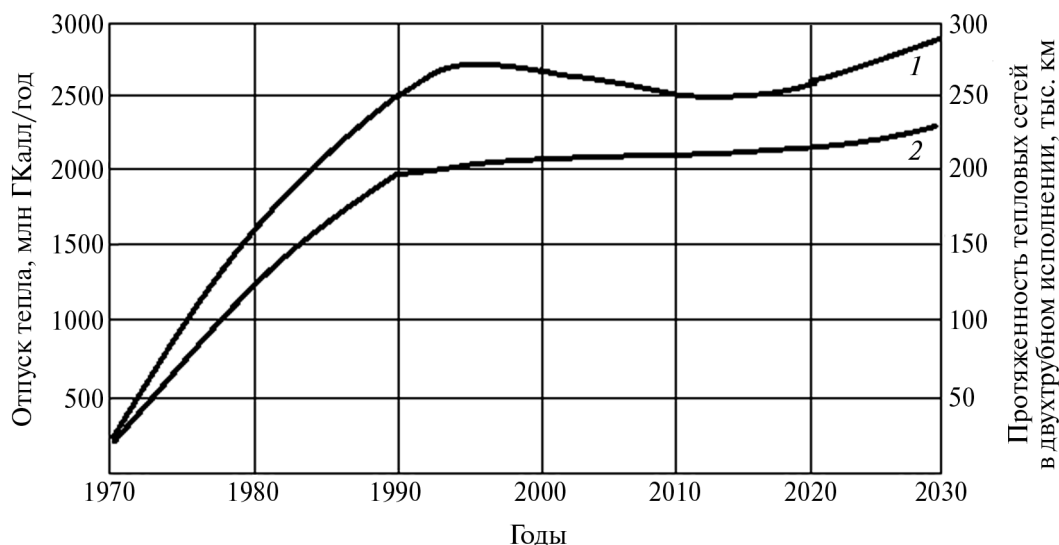


Рис. 1.1. Отпуск тепла (1) и протяженность тепловых сетей (2)

Для систем централизованного теплоснабжения методика определения тепловых потерь основана на данных мониторинга тепловых сетей, а также на величинах нормированных тепловых потерь. Нормируемые тепловые потери установлены в соответствии с нормами СП 61.13330626-2012 «Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. Актуализированная редакция СНиП 41-03-2003» в зависимости от распределения длин трубопроводов и оценки статистического распределения их диаметров. Результаты теоретических и экспериментальных исследований тепловлажностного режима подземных теплопроводов [55, 60] учитываются также при разработке методики определения тепловых потерь.

Нормативные потери тепла в тепловых сетях системы централизованного теплоснабжения ( $Q$ , Гкал/г.) могут быть определены по формуле:

$$Q = \sum_{n=1}^{n=i} 10^{-3} q_i L_i m P_i, \quad (1.1)$$

где  $L$  — общая длина трубопроводов, км, включающая  $n$  диаметров прокладки;  $q_i$  — суммарные нормируемые тепловые трубопровода  $i$ -го диаметра, ккал/м · ч;  $m$  — число часов работы тепловой сети в году, ч/г.;  $P_i$  — вес длины  $i$ -го диаметра в долях единицы от общей длины трубопроводов тепловой сети.

Нормированные потери тепла в тепловых сетях находятся на уровне 8 % от количества теплоты, создаваемой теплогенерирующими установками. Результаты анализа нормативных тепловых потерь представлены в табл. 1.1. Применение систем теплоизоляции и теплоизоляционных конструкций, толщина которых рассчитывается с учетом установленных нормативных показателей теплопотерь, позволяет снижать расчетный показатель по нормированным потерям тепла в тепловых сетях до 3,5 %.

Таблица 1.1

### Характеристики систем теплоснабжения

№ п/п	Показатели	Количество
1	Генерирование тепла системами теплоснабжения, млн Гкал/г.	2120
2	Протяженность тепловых сетей, тыс. км	235
3	Удельные тепловые потери двухтрубной прокладкой, Гкал/г · км (т у.т./г · км)	310 (59)
4	Тепловые потери в сетях системы теплоснабжения, млн Гкал/г. (млн т у.т./г.)	73 (13)

Сверхнормативные потери обуславливаются как недостаточно квалифицированным монажом, типом используемых теплоизоляционных материалов, так и условиями эксплуатации систем изоляции трубопроводов. В процессе эксплуатации трубопровода и системы его изоляции различные воздействия окружающей среды (механические, физические, химические) изменяют свойства теплоизоляционного материала, что, в первую очередь, сказывается на изменении его средней плотности и структуры пористости и определяет долговечность, а следовательно, безремонтный срок эксплуатации системы изоляции в целом.

В условиях эксплуатации конструкции изменения структуры сухого теплоизоляционного материала, обусловленные сезонными атмосферными воздействиями, заметно не влияют на теплотехнические характеристики изоляционной системы (рис. 1.2). При этом нарушение структуры теплоизоляционного слоя в результате «атмосферной пыли» (колебаний влажности, температур, воздействие осадков) увеличивают коэффициент переноса жидкой влаги в изоляции на один — два порядка. Аналогично увеличивается интенсивность переноса капельной влаги. Это приводит к увеличению влажности теплоизоляционного слоя и значительному увеличению его теплопроводности, а следовательно, резкому снижению термического сопротивления изоляционной системы.

Величина реальных тепловых потерь может значительно превосходить нормируемые и обусловлена условиями эксплуатации систем изоляции тепловых сетей, главным образом, за счет сезонных изменений содержания капельной влаги в тепловой изоляции. Конденсация влаги в теплоизоляции определяется как внешними факторами, так и структурой пористости (рис. 1.3).

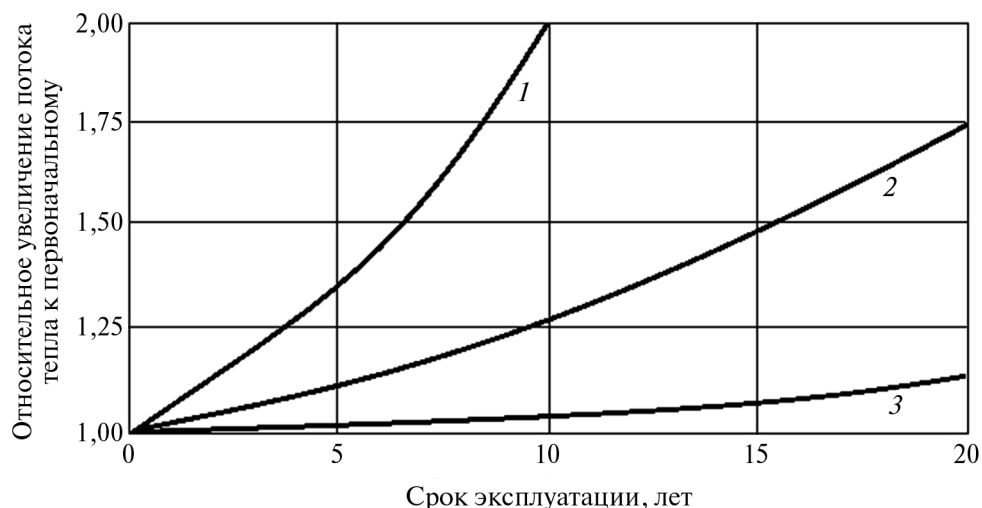


Рис. 1.2. Изменение теплозащитных свойств систем изоляции тепловых сетей в зависимости от длительности эксплуатации:

1 — изоляция на основе минераловатных изделий при прокладке в непроходных каналах с сезонным обводнением канала; 2 — изоляция на основе минераловатных изделий при прокладке в непроходных вентилируемых каналах; 3 — изоляция на основе пенополиуретана при бесканальной прокладке

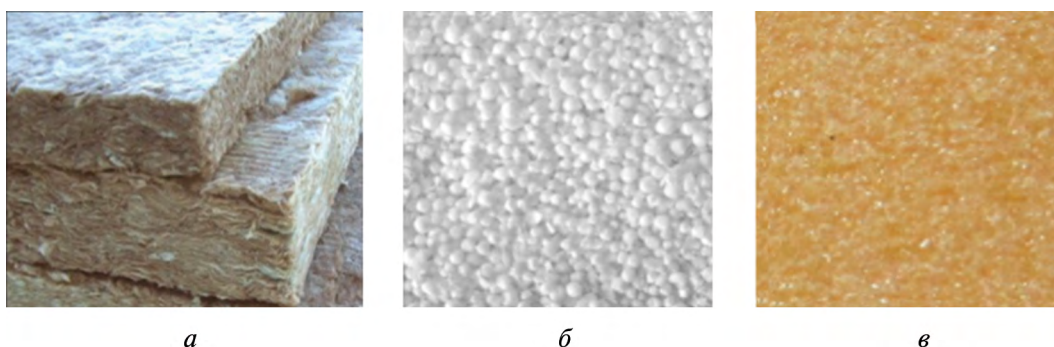


Рис. 1.3. Структура пористости теплоизоляционных материалов:

а — открытая волокнистая; б — зернистая (ячейки или поры сообщаются между собой и с окружающей средой); в — замкнутая (состоит из закрытых, не сообщающихся ячеек размером 0,1–0,2 мм)

Например, периодическое увлажнение и высушивание минераловатной изоляции теплопроводов при сезонном обводнении вызывает уплотнение структуры, т.е. снижение толщины изоляции, а также увеличение ее средней плотности, и соответственно, резкое уменьшение термического сопротивления теплоизоляционного слоя.

Содержание капельной влаги непосредственно увеличивает теплопроводность и, постепенно разрушая структуру теплоизоляционного слоя, приводит к отказу системы изоляции. Все указанные факторы способствуют снижению теплозащитных свойств теплоизоляционных конструкций подземных теплопроводов в процессе эксплуатации (см. рис. 1.2).

Термическое сопротивление системы теплоизоляции конструкций подземных теплопроводов за пятнадцатилетний срок эксплуатации может снижаться по отношению к расчетному не менее чем в два раза. Реальные потери теплоты в тепловых сетях возрастают до 16 % от тепла, генерируемого тепловыми установками.

Содержание во влаге агрессивных веществ действует не только на теплоизоляционный материал, но и на металл трубопроводов, инициируя процессы их коррозии. Важным становится правильный выбор теплоизоляционного материала, способа его монтажа, а также защитных конструкций.



При изоляции трубопроводов могут использоваться как изделия на основе вспененных пластмасс, так и минеральная теплоизоляция. При подземной бесканальной прокладке хорошо зарекомендовала себя теплоизоляция на основе пенополиуретана. В системах изоляции трубопроводов с температурой до 60 °С могут применяться скорлупы и полуматры на основе экструзионного пенополистирола и пенополиизоцианурата, а также цилиндры или маты из пенополиэтилена. Наиболее распространенным теплоизоляционным материалом для изоляции трубопроводов являются изделия на основе минеральной (каменной) ваты: цилиндры и маты, но применение этих изделий предполагает обязательную защиту теплоизоляционных слоев от влажностных и механических нагрузок. Изделия на основе пеностекла сейчас применяют в незначительных объемах, так как этот материал в России не производится.

*Звукоизоляция* — это комплекс инженерных мероприятий, направленный на снижение уровня шума, проникающего через ограждающую конструкцию в помещение. Количественная мера звукоизоляции ограждающих конструкций выражается в снижении уровня шума в дБ (децибелах). Степень необходимости звукоизоляции перекрытий определяется гигиеническими требованиями соблюдения тишины при различных источниках шума в смежных помещениях. Величина звукоизоляции зависит от характеристик используемых материалов и определяется требованиями по соблюдению технологических норм.

*Звукопоглощение* — явление преобразования энергии звуковой волны во внутреннюю энергию среды, в которой распространяется волна. Является определяющим фактором коррекции звукового поля (звуковой среды) в помещениях и связано как с естественным регулированием уровня громкости звука в помещениях, регулированием частотных характеристик этого звука, так и с повышением уровня разборчивости речи (снижением реверберации звука).

Звукоизоляция любой конструкции, согласно СП 51.13330.2011 «Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003», определяется расчетным индексом изоляции воздушного шума  $R_w$  и фактическим индексом изоляции воздушного шума,  $R_w$ . Расчетный и фактический индексы изоляции воздушного шума обозначают разность уровней звука перед и за ограждающей конструкцией. Различие заключается в том, что расчетный индекс определяется в лабораторных условиях и не учитывает влияние полов, смежных стен и т.д. Фактический индекс учитывает влияние акустических эффектов от смежных конструкций.

Ударный шум (структурный шум, передаваемый через жестко соединенные конструкции) характеризуется индексом приведенного уровня ударного шума  $L_{nw}$ . Звукоизоляция в 3 дБ воспринимается человеком как уменьшение громкости примерно в два раза.

Звукоизоляция — это комплекс мероприятий, направленных на достижение акустического комфорта. В обычном понимании хорошая акустика — это сбалансированное сочетание звуков, фоновых шумов и звукоизоляции. В помещении с хорошей акустикой звуки приобретают необходимое звучание, а посторонние шумы исчезают или становятся незначительными.

Чаще всего проблемы акустического комфорта связаны с проникновением шума в помещение извне (рис. 1.4). Необходимо комплексное решение по звукоизоляции помещений как от шума с улицы, так и от шума внутри здания. Обязательные требования, которые должны выполняться при проектировании, строительстве и эксплуатации зданий и сооружений, а также технологических объектов различного назначения с целью защиты от шума и обеспечения нормативных параметров акустической среды, устанавливает СП 51.13330.2011.

Применительно к технической изоляции обязательным является звукоизоляция и виброзащита отдельно стоящих технологических объектов; звукоизоляция трубопроводов любого назначения, особенно в местах проходов через ограждающие конструкции (стены, перекрытия) и пр. Для помещений используются акустические мероприятия, общие

для жилых или общественных зданий. В цехах, с учетом их сложной конфигурации используют в основном индивидуальные подвесные звукопоглотители.

На основе требований строительной акустики материалы делятся на звукопоглощающие (применяемые для коррекции воздушного шума в конструкциях звукопоглощающих облицовок и отдельных звукопоглотителей); звукоизолирующие (применяемые для защиты от ударного шума в многослойных ограждающих конструкциях и в качестве прокладок в плавающих полах, изоляции проходов труб сквозь ограждения).

Вибропоглощающие материалы применяют в основаниях технологических объектов с целью снижения механических колебаний (в том числе и в области инфразвука), распространяющихся по жестким конструкциям.

Акустическими свойствами обладают все виды теплоизоляционных материалов. Наиболее эффективными звукоизоляторами считаются изделия на основе каменной ваты, экструзионного пенополистирола и пенополиэтилена, а виброзащитными материалами являются вспененные резины.

Результаты акустических испытаний конструкции слоистых (плавающих) полов, включающих в качестве упругого слоя звукоизоляцию из вспененных пластмасс толщиной 50 и 100 мм и «плавающую» бетонную стяжку с поверхностной плотностью 100 кг/м<sup>2</sup> толщиной 40 мм показали: данные конструкции пола обеспечивают значения индексов приведенного ударного шума  $L_{nw}$  под перекрытием 54 и 52 дБ соответственно, что не превышает требуемое значение 60 дБ; данные конструкции пола обеспечивают значения индексов улучшения ударного шум перекрытием 24 и 26 дБ, что превышает требуемое значение 18 дБ.

XPS-плиты толщиной 50 и 100 мм, согласно СП 51.13330.2011 и ГОСТ 23499–2009 «Материалы и изделия звукоизоляционные и звукопоглощающие строительные. Общие технические условия», могут быть использованы в жилых, общественных и производственных зданиях в конструкциях «плавающего» пола в помещениях с высокими требованиями к изоляции ударного шума.

## 1.2. Теплозащита ограждающих конструкций

Теплозащита промышленных зданий незначительно отличается от теплозащиты жилых и общественных зданий и включает в себя системы изоляции полов (фундаментов), стен и кровли. Выбор системы изоляции зависит от условий эксплуатации объекта и реализуемой несущей системы [20]. В ограждающих поверхностях современных каркасных зданий используются сэндвич-панели; кровля по профилированному настилу утепляется либо минераловатными плитами, либо используется комбинированная теплоизоляция (снизу — минераловатная плита; сверху — плита из экструдированного пенополистирола).

Промышленные полы утепляют по системе плавающего пола с применением эффективных теплоизоляционных материалов, имеющих высокую эксплуатационную стойкость к воздействию влаги грунта и низкую влагопроницаемость. В этом отношении хорошо себя зарекомендовал экструзионный пенополистирол (XPS-плиты) и рулонный вспененный полиэтилен (рис. 1.5).

В системах изоляции бескаркасных сооружений (например, ангарного типа) стремятся использовать технологии, позволяющие получать бесшовные изоляционные обо-

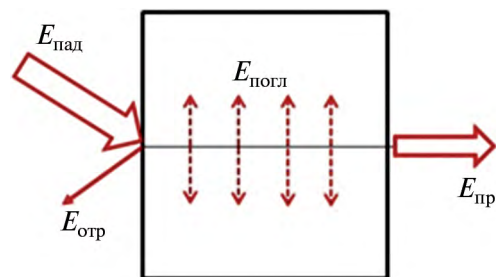


Рис. 1.4. Механизм поглощения звуковой энергии материалами из каменной ваты:  $E_{пад}$  — падающая звуковая энергия;  $E_{отр}$  — отраженная звуковая энергия;  $E_{погл}$  — звуковая энергия, поглощенная материалом;  $E_{пр}$  — звуковая энергия, прошедшая через материал

лочки. Это достигается за счет применения напыляемого пенополиуретана (с адгезионным креплением) или рулонного пенополиэтилена (с механическим креплением). Крепление за счет адгезии напыляемого пенополиуретана к оцинкованному металлу бескаркасной конструкции не всегда удобно, так как различные коэффициенты теплового расширения стали и пенополимера ослабляют контакт и могут стать причиной отслоения изоляционных слоев.

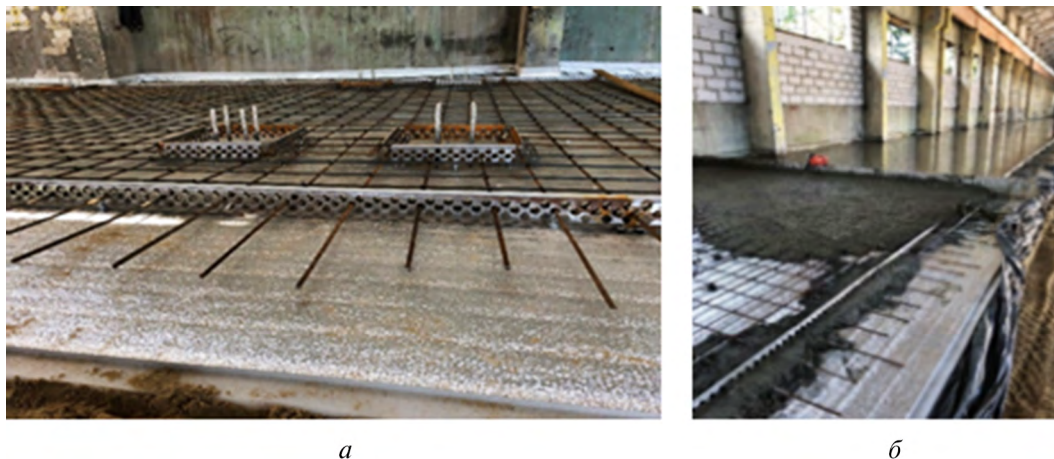


Рис. 1.5. Промышленный плавающий пол:  
*а* — установка арматурных каркасов и разделительных элементов; *б* — заливка бетона

Рулонный вспененный полиэтилен с металлизированным покрытием механически закрепляется на внутренней поверхности оболочки из профилированного металла, отдельные рулоны соединяются в замок и свариваются горячим воздухом (строительным феном), формируя тем самым бесшовную изоляционную оболочку (рис. 1.6).



Рис. 1.6. Формирование изоляционной оболочки

Если говорить об общих тенденциях энергосбережения, то этот процесс является функциональной реализацией двух направлений: разработки основ для оптимизации нормативных потерь и снижения опасности возникновения сверхнормативных потерь. Реализация этих двух основных тенденций основана на применении современных систем изоляции и использовании теплоизоляционных материалов с высокой эксплуатационной стойкостью [56–58].

С 1990 г. сформирована нормативная база, разработаны или актуализированы ГОСТы и своды правил, в которых устанавливаются новые требования как к теплоизоляционным материалам, так и к проектированию и монтажу строительных изоляционных конструкций; вошло в обиход понятие строительной системы. Подобные системы разработаны для всех элементов здания и позволяют оптимизировать нормативные затраты и сводить к оправданному минимуму сверхнормативные затраты, как правило, за счет повышения эксплуатационной стойкости материалов, качественного монтажа и обеспечения долговечности конструкций.

## Глава 2

# ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ ГАЗОНАПОЛНЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

### 2.1. Структура и свойства газонаполненных материалов

#### 2.1.1. Морфологические понятия и структурные параметры

Теплотехнические, механические и другие свойства теплоизоляционных материалов определяются особенностями их строения. Теплоизоляционные материалы (ТИМ) представляют собой разнообразные газонаполненные системы, при этом имеют место два основных типа структуры: волокнистая и ячеистая. Основными представителями этих групп являются минераловолокнистые материалы (на основе стеклянных, каменных, базальтовых волокон) и материалы с ячеистой пористостью.

Образование ячеистых структур характеризуется рядом общих черт вне зависимости от природы материала: стекло, керамика, цементные композиции или полимеры. За исключением получения теплоизоляции на основе аэрогелей, при создании вспененного (газонаполненного) материала протекают физические, физико-химические или химические процессы [5, 6]. Газ может вводиться в материал методом конденсации или за счет химической реакции. Сначала происходит образование центров и рост газовых пузырьков, а затем стабилизация их размеров. Рост и стабилизация сопровождаются коалесценцией части пузырьков за счет слияния или поглощения мелких пузырьков пузырьками больших размеров. Процессы завершаются фиксацией ячеистой структуры за счет отверждения материалов, выполняющих функции вяжущего (связующего). Результатом является формирование структуры газонаполненных материалов, которая содержит полностью или частично изолированные либо сообщающиеся ячейки.

Теплоизоляционный материал, таким образом, с одной стороны, может рассматриваться как дисперсионная система, в которой дисперсной фазой является газ, и дисперсионная среда — твердое тело, а с другой стороны, как композиционный материал. Ячеистый материал как композит состоит из ячеек, заполненных газом, и органической или минеральной матрицы [6, 87]; волокнистый материал — это композит из волокон, омоноличенных связующим.

Структура газонаполненных материалов состоит из твердой фазы (матрицы) и газовой фазы, а свойства этих материалов определяются, во-первых, объемным соотношением газовой и твердой фаз, во-вторых, характером распределения газовой фазы в материале, и, в-третьих, свойствами матрицы.

Основной морфологической характеристикой пористых материалов является ячейка, в ранних работах систематика данных объектов основывалась на этом морфологическом параметре. Анализ газонаполненных систем показывает, что свойства последних связаны не только с самой ячейкой (ее формой и размером), но также зависят от конфигурации ребер и стенок ячеек, т.е. определяются особенностями межъячеистого пространства.

Для получения многих теплоизоляционных материалов не требуется вспенивания, формирующего собственно ячеистую систему. К этой группе относят все волокнистые теплоизоляционные материалы (на основе минеральных, синтетических, древесных, целлюлозных волокон и пр.). Образование таких материалов обусловлено переплетением (свойлачиванием) волокон и формированием волокнистой структуры анизотропной формы, содержащей капилляры и поры.

Выбирая универсальный элемент, характеризующий высокопористую структуру, уместно традиционное понятие «ячейка» заменить на более универсальную морфологическую характеристику — газоструктурный элемент (ГСЭ). В некоторых случаях непосредственным аналогом ГСЭ является элементарный объем.



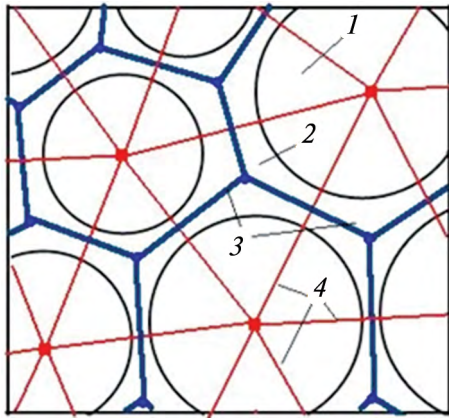


Рис. 2.1. Геометрические характеристики структуры на примере ячеистого материала:  
 1 — поры (ячейки) в материале;  
 2 — межпоровые перегородки; 3 — расположение осей каркаса; 4 — расположение осей конвективных потоков

материалы можно разделить на две группы. Первая группа — это ячеистые (или пенистые) материалы, содержащие изолированные газоструктурные элементы. Вторая группа — пористые материалы, содержащие сообщающиеся газоструктурные элементы (рис. 2.1).

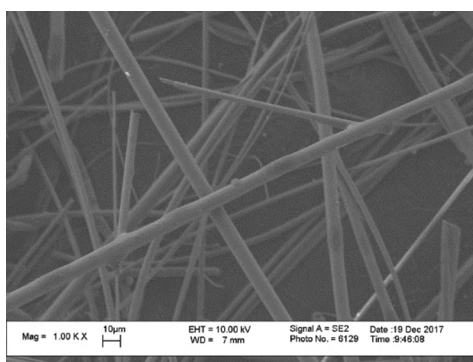
Особенности газоструктурных элементов определяются типом пористости и видом вещества матрицы. У сотовых пластиков (сотопластов) газоструктурные элементы состоят из газовой фазы, заключенной в объем правильного многогранника. Твердая фаза может быть представлена гранями из гидрофобизированной бумаги или ткани, пропитанной полимерным связующим.

У волокнистых теплоизоляционных материалов газоструктурные элементы состоят из газовой фазы, заключенной в объем, образованный элементарными нитеобразными структурами волокон, закрепленными механически или с помощью связующего (рис. 2.2). Газоструктурные элементы материалов, имеющих частично сообщающую ячеистую структуру, включают в себя ячейки, заполненные газом, капилляры, соединяющие эти ячейки и пронизывающие матрицу материала,

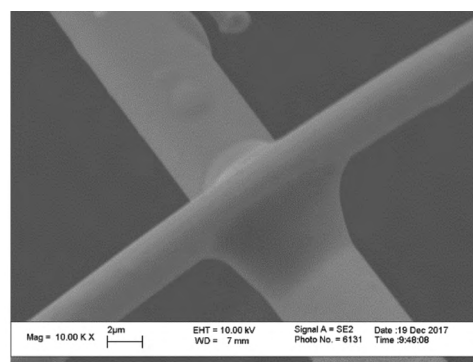
В общей теории структурообразования *газоструктурным элементом* называют элементарный объем газовой и твердой фаз, образованный совокупностью единичных элементов, или первичную пространственную структуру ячеистых материалов любой природы.

Эти единичные элементы повторяются с определенной нерегулируемой и хаотичной периодичностью. Степень упорядоченности газоструктурных элементов и частота их повторений определяются статистическими законами для всего объема газонаполненной системы или для всего объема исследуемого материала.

На основе введенного понятия газоструктурного элемента все газонаполненные



а



б

Рис. 2.2. Структура минераловатного ковра:  
 а — общий план; б — контакт между волокнами

Основными структурными характеристиками газонаполненных материалов являются пористость, удельная поверхность и распределение пор по размерам.

**Пористость.** Отношение объема пор и капилляров, заключенных в выделенном объеме материала, к этому объему называется объемной пористостью, или просто пористостью тела. Если известна плотность теплоизоляционного материала  $\rho_M$  и плотность мате-

риала, образующего твердый скелет его капиллярно-пористой структуры,  $\rho_T$ , то пористость определяется по формуле:

$$m = (\rho_T - \rho_M) / \rho_T. \quad (2.1)$$

Плотность теплоизоляционных материалов изменяется от 10 до 600 кг/м<sup>3</sup>, а плотность скелета (матрицы) находится в пределах 1000–2500 кг/м<sup>3</sup>. Используя формулу (2.1), получаем, что пористость теплоизоляционных материалов составляет обычно 0,7–0,99.

Рассматривая отношение площади пор и капилляров в выделенном сечении капиллярно-пористого тела к площади этого сечения, приходим к понятию поверхностной пористости  $m_F$ . Если провести в выделенном сечении прямую определенной длины, то отношение суммы ее отрезков, приходящихся на поры и капилляры, к общей длине прямой будет определять линейную пористость  $m_i$ . Для большинства теплоизоляционных материалов объемная, поверхностная и линейная пористости равны:  $m = m_F = m_i$ .

Применительно к капиллярно-пористым телам, и в частности, к теплоизоляционным материалам, различают пористость внутреннюю и общую. К первой относят пористость собственно каркаса или частиц, образующих твердую структуру материала, при характеристике второй учитывают общий объем пор и капилляров. Например, для зернистого теплоизоляционного материала — перлитного песка — внутренней будет пористость собственно частиц вспученного перлита, а общая пористость определяется суммарным объемом пор и капилляров, содержащихся в частицах и образованных межзерновым пространством между частицами. Если для перлитного песка в формуле (2.1) в качестве  $\rho_T$  подставить плотность вещества, образующего частицы перлита, то получим значение общей пористости, если плотность частиц — межзерновую пористость, равную разности между общей и внутренней. Используются также понятия открытой и закрытой пористости. Открытой обычно считают такую пористость, которая может быть заполнена жидкостью при непосредственном контакте с ней материала, тогда закрытой пористостью будет являться разность между общей и открытой пористостью.

**Удельная поверхность.** Отношение площади поверхности пор и капилляров, находящихся в выделенном объеме тела, к этому объему называется удельной поверхностью. Применительно к тонкопористым телам, в частности к адсорбентам, удельная поверхность выражается отношением площади поверхности пор и капилляров к единице массы вещества. Удельная поверхность теплоизоляционных материалов весьма велика и колеблется в широких пределах. Для минеральной ваты она составляет около  $(1-2) \cdot 10^4$ , для перлитного песка —  $1 \cdot 10^6$  м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup> и более. По аналогии с пористостью различают общую, наружную и внутреннюю удельную поверхности. Наружная поверхность — внешняя поверхность пор и капилляров, образованных твердой структурой тела; внутренняя — поверхность пор и капилляров, содержащихся в самом каркасе капиллярно-пористого тела; общая — сумма наружной и внутренней поверхностей. Внутренняя поверхность пористых тел обычно на несколько порядков больше наружной, поэтому общая удельная поверхность материала будет, главным образом, внутренней.

При использовании наиболее распространенного метода определения удельной поверхности — метода адсорбции газов или паров — находят общую удельную поверхность тела. Если применяют методы, основанные на фильтрации жидкости или газа через пористую структуру тела, определяют наружную удельную поверхность, поскольку внутренняя не влияет на процесс фильтрации.

**Закон распределения пор по размерам.** Предположим, что нам известно число пор или капилляров  $n$ , м<sup>-2</sup>, различного радиуса  $r$ , приходящихся на единицу площади сечения капиллярно-пористого тела. Если по оси ординат отложить число капилляров, имеющих радиус меньше  $r$  и приходящихся на единицу площади, а по оси абсцисс — соответствующие радиусы капилляров, получится интегральная кривая распределения числа капилляров по радиусу (рис. 2.3, а). Зависимость между производной  $dn/dr$  и радиусом называется дифференциальной кривой распределения по радиусу (рис. 2.3, б).

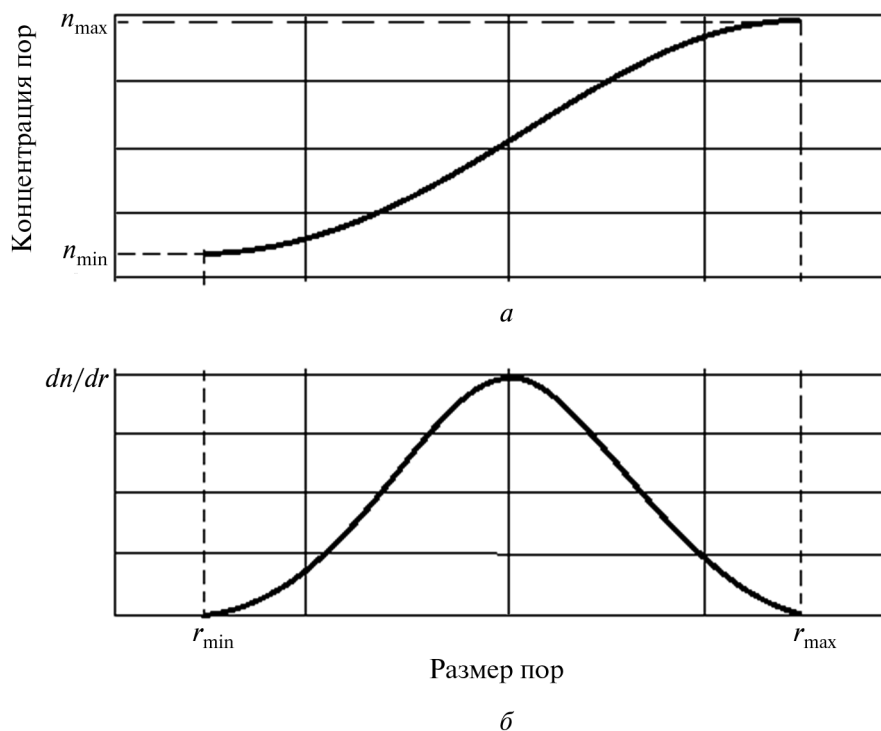


Рис. 2.3. Кривые распределения пор по радиусу:  
*a* — интегральная кривая; *б* — дифференциальная кривая

В основе определения размеров пор и оценки распределениями пор материала по размерам (радиусам) лежат методы ртутной порометрии. По результатам эксперимента находят объем пор  $V_r$  в единице объема тела, соответствующих определенному радиусу. В некоторых случаях (например, для оценки пористости волокнистых материалов и оценки распределений диаметров и длин волокон) используют сканирующий микроскоп. При наличии только интегральных кривых возможно применение графического дифференцирования.

### 2.1.2. Взаимосвязь структуры и свойств газонаполненных материалов

Важнейшим параметром, выражающим относительное содержание твердой и газообразной фаз в теплоизоляционном материале, является кажущаяся плотность (объемный вес), которая позволяет перейти к количественной оценке структурных особенностей данных материалов. Действительно, эта величина является основополагающим морфологическим параметром, оказывающим определяющее влияние на технические свойства газонаполненных материалов, — прочностные, теплофизические и т.д.

В общем случае плотность ячеистого материала описывается выражением [30, 59]:

$$\gamma = \gamma_0(1 - G) + \gamma_{\Gamma}, \quad (2.2)$$

где  $\gamma_0$  — плотность твердой фазы;  $G$  — газонаполненность пены;  $\gamma_{\Gamma}$  — плотность газа в ячейках.

В практических случаях  $\gamma$  вычисляют как отношение веса образца  $Q$  к его геометрическому объему  $V$ :

$$\gamma = Q/V. \quad (2.3)$$

Связь средней плотности с другими структурными характеристиками газонаполненных систем (вспененных пластмасс, пеностекла и пр.) устанавливается следующим соотношением:

$$\gamma = \pi \delta_{\text{кр}} \gamma_0 / (d - d_{\text{кр}}), \quad (2.4)$$

где  $d$ ,  $\delta_{\text{кр}}$  — соответственно диаметр ячейки и критическая (минимальная) толщина мембраны (стенки) ячейки.

При этом граничные условия применимости уравнения, связывающего среднюю плотность и газоструктурные характеристики (2.4), определяются из неравенства:

$$d_{\text{кр}} \leq d \leq d_{\text{max}}, \quad (2.5)$$

где  $d_{\text{кр}}$ ,  $d_{\text{max}}$  — минимальный и максимальный диаметры ячейки стабилизированной (устойчивой) пены.

Значения основных морфологических параметров (диаметра ячеек и толщины стенок ячеек) соответствуют стабильной структуре жидкой пены определенной плотности, оказывающей значительное влияние на прочность вспененных материалов. Диапазон изменений этих морфологических параметров связан с физико-химическими особенностями формирования конкретных ячеистых структур различных типов минеральных систем или полимеров (см. рис. 2.1). Характерная связь плотности с прочностью газонаполненных систем может быть выражена следующим эмпирическим соотношением [11, 12]:

$$\sigma \cong \gamma^a, \quad (2.6)$$

где  $\gamma$  — средняя (кажущаяся) плотность пеноматериала;  $a$  — коэффициент, зависящий от вида напряженного состояния и от природы материала.

Важнейшей технической характеристикой газонаполненных материалов, определяющей их теплозащитные свойства, является теплопроводность  $\lambda$ .

Теплопроводность различных веществ колеблется в следующих пределах: газов — от 0,00594 (четырёххлористый углерод) до 0,0287 Вт/(м · К) (кислород); жидкостей — от 0,0895 (фреон-12) до 0,564 Вт/(м · К) (вода); твердых органических веществ — от 0,134 (технический каучук) до 0,465 Вт/(м · К) (волокна древесины); природных каменных материалов — от 1,28 (мел) до 15,82 Вт/(м · К) (кварц), кристаллических тел — от 1,17 (хлорат натрия) до 628 Вт/(м · К) (алмаз); металлов и сплавов — от 21 (титан) до 407 (серебро) Вт/(м · К).

В соответствии с требованием минимальной теплопроводности теплоизоляционные материалы представляют собой композиционные структуры, образованные из неорганических и органических материалов с максимальной пористостью. Очевидно, что для создания каркаса пористой структуры предпочтительнее использовать вещества, имеющие сравнительно низкую теплопроводность, например, органические. В качестве среды, заполняющей поры, обычно используют воздух. Иногда применяют инертные газы и газы, имеющие меньшую, чем у воздуха, теплопроводность, например, фреон (коэффициент теплопроводности менее 0,014 Вт/(м · К)).

Коэффициент теплопроводности высокопористых газонаполненных материалов ( $\lambda$ ) определяется эффективными локальными потоками тепла. Этот коэффициент можно рассматривать как сумму коэффициентов теплопроводности твердой фазы ( $\lambda_{\text{ТВ}}$ ), теплопроводности газа ( $\lambda_{\text{Г}}$ ), конвективной ( $\lambda_{\text{К}}$ ) и лучистой, или радиационной ( $\lambda_{\text{Р}}$ ), составляющих теплопередачи [13, 14, 51]:

$$\lambda = \lambda_{\text{ТВ}} + \lambda_{\text{Г}} + \lambda_{\text{К}} + \lambda_{\text{Р}}. \quad (2.7)$$

Теплоизолирующие характеристики теплоизоляционного материала тем выше, чем меньше вклад каждой из компонент в суммарную величину  $\lambda$ .

В первую очередь коэффициент теплопроводности определяется содержанием твердой фазы как наиболее температуро- и теплопроводящего компонента. Структура газонаполненных систем характеризуется малыми плотностями, незначительным содержанием твердой фазы, пористостью, заполняемой воздухом. Коэффициент теплопроводности



вспененных полимеров находится в пределах 0,029–0,035 Вт/(м · К). Увеличение доли твердой фазы (матрицы) с возрастанием плотности пеноматериала приводит к повышению коэффициента его теплопроводности. В частности, при увеличении средней плотности фенольных пенопластов с 42 до 83 кг/м<sup>3</sup> коэффициент теплопроводности возрастает на 32 %.

Конденсация влаги в районе температуры точки росы и диффузия капельной влаги из окружающей среды оказывает значительное влияние на теплопроводность газонаполненных материалов. Диффузия влаги и паровоздушной смеси зависит от особенности строения изоляционных материалов. В первую очередь особенности строения определяются соотношением замкнутых, частично закрытых и открытых пор, формы и размера газоструктурных элементов, химической природы твердой фазы и др. Для пенопластов с открытой сообщающейся ячеистой пористостью возрастание влажности с 5 до 20 % приводит к увеличению коэффициента теплопроводности в 1,5 раза.

Для вспененных пластмасс получена следующая интегральная зависимость коэффициента теплопроводности от плотности и влажности теплоизоляционного материала:

$$\lambda = 0,0004(10 + \gamma) + \gamma \omega 0,16 \cdot 10^{-4}. \quad (2.8)$$

С учетом того, что содержание газовой фазы в материале превышает 90 %, этот параметр вносит наибольший вклад в теплопередачу [31] и зависит от природы газа. Отметим, что теплопроводность газообразователя (газа в ячейках), меньшая, чем теплопроводность иммобилизованного в ячейках материала воздуха, предопределяет меньшую интегральную теплопроводность материала.

В процессе хранения или эксплуатации в результате диффузии вспенивающий газ замещается на воздух, и реальная теплопроводность материала возрастает. Процесс установления диффузионного равновесия между газом в ячейке и окружающей средой может продолжаться несколько лет, и при этом постоянно происходит снижение термического сопротивления конструкции до достижения определенного плато.

Лучистый теплообмен, как и конвекционные потоки в газонаполненных материалах, существенным образом зависят от особенностей строения их газоструктурных элементов, т.е. от особенностей макроструктуры этих материалов. Радиационный теплообмен (а следовательно, эта составляющая теплопроводности) пропорционален четвертой степени разности температур и поэтому проявляется в тем большей степени, чем выше температура высокопористого материала.

Возвращаясь к такой базовой характеристике, как газоструктурный элемент, необходимо отметить важность для теплопроводности таких параметров, как размер ячеек и наличие массопроводных мостиков между ячейками и между ячейками с окружающей средой.

При теплообмене в стенках ячеек высокопористого материала инициируются следующие процессы: рассеяние, поглощение и излучение тепла. Поэтому более мелкие ячейки оказывают большее сопротивление лучистому теплообмену, чем крупные. Теплопроводность высокопористых материалов в большей мере определяется изменением размеров газоструктурных элементов и в меньшей степени плотностью этих материалов [79].

Аналогичная взаимосвязь наблюдается при конвективном теплообмене [74, 76]. Конвекционные потоки возникают в ячейках с размерами более 2 мм. Такие ячейки характерны для материалов с низкими плотностями, менее 25 кг/м<sup>3</sup>.

Большинство используемых пеносистем имеет мелкочаеистую структуру. Поэтому вклад конвективной доли теплообмена в теплопередачу незначителен для большинства теплоизоляционных материалов, имеющих мелкую замкнутую пористость, и возрастает по мере увеличения размеров пор, возникновения массопроводимых мостиков в структу-

ре материала. Для волокнистых материалов, характеризующихся открытой пористостью, конвективный вклад в теплопроводность становится весьма ощутимым.

Заметное влияние на коэффициент теплопроводности конвективной ( $\lambda_k$ ) и лучистой, или радиационной ( $\lambda_r$ ), составляющих наблюдается только для очень легких газонаполненных систем, структура которых характеризуется крупными газовыми включениями, взаимосвязанными между собой [65].

Влияние дисперсности (удельной поверхности) на формирование свойств пенопластов значительно. Пенопласты одной марки, но разной степени дисперсности могут иметь существенно различные теплофизические свойства, рабочие температуры эксплуатации и пожарно-технические характеристики, а следовательно, и различные области применения.

## 2.2. Газонаполненные фенольные и карбамидные полимеры

### 2.2.1. Фенольные и карбамидные пенопласты

В настоящее время (2019 г.) по политическим причинам и в силу экономических преобразований фенольные и карбамидные пенопласты производятся в небольших объемах и в качестве ТИМ практически не применяются. Фенольные пенопласты используют в РФ только в авиастроении (ВПП-4 ФГУП «ВИАМ»), а в качестве ТИМ применяют во многих странах мира. Нижеприведенные разделы не теряют своей научно-технической значимости, а методы, подходы и инструменты применимы практически для всех видов ТИМ.

Прогнозировать свойства пенопластов и объяснять их поведение в реальных условиях эксплуатации невозможно без глубокого изучения особенностей строения этих материалов. Кроме того, данные о морфологии пенопластов позволяют перейти к моделированию оптимальных структур таких систем и открывают возможность целенаправленно получать пенокомпозиции с наперед заданными свойствами.

Влияние структуры пенопластов на физико-механические характеристики установлено давно [26–28]. Многие авторы сходятся во мнении об определяющем влиянии структурного каркаса пены на ее физико-механические характеристики. Подавляющее большинство работ относится к изучению структуры пенополиуретанов. Результаты исследований морфологии фенольных пенопластов касаются ограниченного круга этих пеноматериалов, представленных, как правило, давно разработанными промышленными марками, причем, преимущественно, для изоляции тепловых сетей. Подробные данные о структуре карбамидных пен практически отсутствуют. В связи с этим всесторонние исследования ячеистого строения фенольных и карбамидных пенопластов новых видов представляют большое практическое значение, поскольку дают представление о важнейших свойствах данных пеноматериалов и эффективных областях их применения [22].

**Структура фенольных пенопластов.** Структура фенольных пенопластов анизотропна. Для этой структуры характерно сосредоточение полимера-основы в прямолинейных стержнях газоструктурных элементов. Эти стержни (тяжи) на значительном протяжении имеют постоянное сечение и незначительные утолщения в узлах, образующихся в результате слияния трех, а чаще четырех стержней. Грани ячеек представлены, в основном, 4–6-угольниками.

Гистограммы распределения линейных размеров ячеек фенольных пенопластов представлены на рис. 2.4. Для резольноноволачных пенополимеров характерно увеличение доли ячеек с размерами 5 мкм и меньше. В группе фенольных пеноматериалов типа «Виларес» средний размер ячеек почти в 3 раза меньше размера ячеек ФРП-1. Для всех типов рассмотренных пенопластов общим является наличие совокупности ячеек, одинаковых по размерам и достаточно равномерно распределенных по объему пеноматериала. Для пенопластов Виларес-400А и Виларес-400МХ эта совокупность характеризуется размерами ячеек от 5 до 45 мкм, для ФРП-1 — от 15 до 75 мкм.

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)