

## Значение курса «Холодильные установки».

В курсе «Холодильные установки» изучаются разделы холодильной техники, относящиеся к промышленному производству его применению в различных областях промышленности для выполнения технологических процессов при умеренно низких температурах (до температуры  $-160^{\circ}\text{C}$ , близкой к температуре сжижения метана при атмосферном давлении). В задачу курса входит ознакомление с основными положениями рационального проектирования холодильных установок, а также монтажа и эксплуатации холодильного оборудования предприятий, в которые искусственный холод входит как необходимое (а иногда важнейшее) звено технологического процесса.

Холодильная установка представляет собой совокупность машин, аппаратов и сооружений, предназначенных для производства и применения искусственного холода. В этом смысле холодильная установка в дополнение к четырем основным элементам, составляющим машину (или в дополнение к основным элементам систем безмашинного охлаждения), включает в себя еще аппараты, приборы, трубопроводы и даже сооружения, необходимые как для совершения технологических процессов при низких температурах, так и для рациональной эксплуатации холодильного оборудования при длительном промышленном использовании.

Большая часть основных положений, рассмотренных в курсе, применима для холодильных установок любой отрасли промышленности, однако в некоторых разделах курса рассмотрены глазным образом холодильные установки в пищевой промышленности, прежде всего потому, что здесь в большей степени и комплексно сосредоточены особенности, характерные для различных холодильных предприятий.

Производство искусственного холода, т. е. достижение температур ниже температуры окружающей среды, и осуществление различных технологических процессов при этих температурах находят все расширяющееся применение во многих отраслях народного хозяйства. Холодильная техника оказалась нужной почти всем областям человеческой деятельности. Развитие некоторых отраслей нельзя себе представить без применения искусственного холода. В пищевой промышленности холод обеспечивает длительное сохранение высокого качества скоропортящихся продуктов; и именно из-за недостаточного еще использования холода в мире теряется в среднем 25% произведенных пищевых продуктов. По масштабам потребления искусственного холода важное место занимает химическая промышленность. В химической промышленности искусственный холод применяется для разделения жидких и газовых смесей и получения чистых продуктов (например, этилена, пропана, пропилена из нефти и природного газа), при производстве многих синтетических материалов (спирта, каучука, пластмасс, волоком и др.), при производстве аммиака и азотных удобрений, для отвода теплоты химических реакций; в машиностроении внедряются низкотемпературная закалка металлов и холодные посадки. Искусственное замораживание грунтов оказывается эффективным средством для выполнения строительных работ в водоносных слоях; искусственное охлаждение бетона применяется при строительстве плотин крупнейших гидростанций. Холод используется при производстве большого числа материалов и изделий. При помощи холода создается искусственный климат в закрытых помещениях (кондиционирование воздуха), в любое время года и в любом климате могут быть созданы искусственные ледяные катки. Широко применяется искусственный холод на различных видах транспорта для перевозки пищевых продуктов, а также на судах рыболовного флота, в торговле пищевыми продуктами и в быту.

В основе применения холода для различных производственных целей лежит тот факт, что многие физические, химические, биологические и другие процессы протекают при низких температурах, существенно отличаясь от того, как они выполняются при обычных условиях. Как общее правило, все эти процессы при низких температурах замедляются, а некоторые из них (например, жизнедеятельность отдельных видов бактерий) прекращаются. Существуют, однако, процессы, которые при низких температурах протекают интенсивнее, чем при высоких (например, превращение аустенита в мартенсит при закалке высоколегированных инструментальных сталей); понижение температуры, при которой происходит реакция, позволяет получать полимеры с более высокой молекулярной массой, т. е. более прочные и упругие. При

низких температурах меняются свойства многих материалов. Так, некоторые сорта стали при температурах ниже (-30) — (-40)° С становятся менее пластичными и более хрупкими, а медь и алюминий, наоборот, при тех же температурах повышают пластичность, становятся более вязкими.

### **Краткие сведения из истории развития холодильной техники**

Много столетий назад уже были известны способы сохранения и использования естественного холода: накапливание льда и снега в ледниках для хранения продуктов, хранение продуктов в глубоких ямах (использование низкой средней температуры грунта), охлаждение воды при ее испарении. Только в XVII в. началось применение смесей льда и соли для получения более низких температур, чем температура плавления водного льда. Промышленные холодильные машины появились лишь в середине XIX в.

Первоначально искусственное охлаждение в широких масштабах начинает применяться при заготовке и транспортировке пищевых продуктов. Первая установка для замораживания мяса была построена в г. Сиднее в 1861 г. В этом же году (и также в Австралии) на нефтеперерабатывающем заводе была установлена холодильная машина для выделения парафина из сырой нефти, что явилось началом внедрения искусственного холода в отрасли химической промышленности. К концу 70-х и началу 80-х гг. прошлого столетия относятся первые попытки перевозок мяса в Южной Америки и Австралии во Францию и Англию на судах-холодильниках с воздушными и абсорбционными холодильными машинами. Перепонка продуктов в железнодорожных вагонах с ледяным охлаждением началась в 1858 г. в США. Первый крупный холодильник с машинным охлаждением был сооружен в Бостоне (США) в 1881 г. В том же году был построен холодильник в Лондоне, а в 1882 г. - в Берлине.

В России холодильное хозяйство стало развиваться сравнительно поздно и медленно. Первые холодильные машины появились в 1888 г. на рыбных промыслах в Астрахани. В 1889 г. были сооружены две холодильные установки на пивоваренных заводах. С 1892 г. появляются мелкие льдозаводы на Кавказе, в Средней Азии, Крыму. Первый холодильник емкостью 250 т был построен в 1895 г. в Белгороде. Первые железнодорожные перевозки в вагонах, охлаждаемых льдом, начались в России примерно в то же время, что и за рубежом, а именно в 1860 г. Серьезным толчком для развития холодильного транспорта и сети холодильников в России явилось окончание в середине 90-х годов постройки Сибирской железной дороги, связавшей богатую сельскохозяйственными продуктами Сибирь с портами Балтийского моря. В связи с этим началось строительство холодильников в районах заготовок продуктов, на железнодорожных узлах и в портах. До 1914 г. было построено всего 29 холодильников общей емкостью 45 600 т. В это же время емкость холодильников в США приближалась к 2 млн. т. Во всех же отраслях промышленности России имелось 296 холодильных установок с общей холодильной мощностью при нормальных сравнительных условиях 27 млн. ккал/ч.

Недостаточное развитие холодильного хозяйства явилось одной из причин плохого снабжения русской армии во время первой мировой войны. Всего в 1917 г. насчитывалось 58 холодильников общей емкостью 57 300 т и холодильной мощностью установок 20,3 млн. ккал/ч. Недостаточен был также холодильный транспорт: в 1917 г. было только 6500 двухосных железнодорожных вагонов с ледяным охлаждением, одно рефрижераторное судно грузоподъемностью всего 185 т и восемь судов, имевших холодильные установки.

В годы гражданской войны холодильному хозяйству был нанесен существенный ущерб. В период 1918 по 1925 гг. производилось восстановление и реконструкция старых предприятий. С 1925 г. началось строительство крупных холодильников, в первую очередь в портовых городах. В эти же годы положено начало строительству холодильников в мясной, молочной и других отраслях пищевой промышленности, а также в системе путей сообщения. За годы пятилеток холодильное хозяйство сделало качественный скачок, превратившись в мощную индустрию. Построены крупные мясокомбинаты, молочные комбинаты и рыбокомбинаты.

Значительно расширилась сеть холодильников. Все новые предприятия строились на высоком техническом уровне. В предвоенные годы были построены холодильники с пониженным температурным режимом [в помещениях для хранения мороженых грузов предусматривалась температура

—18° С, вместо (—8)—(—12)° С, в помещениях для замораживания —23° С вместо —18° С в старых холодильниках]. В 1941 г. емкость холодильников в нашей стране составляла 370 тыс. т, т. е. была в 6,5 раза больше, чем в 1917 г. Во время войны холодильное хозяйство Советского Союза значительно пострадало, но в результате больших восстановительных работ уже к концу 1948 г. емкость холодильников стала равной 105% от довоенной. Восстановление холодильников сопровождалось их расширением, оснащением новейшим холодильным оборудованием и понижением температурного режима.

В результате выполнения семилетнего плана (1959—1965 гг.) и восьмого и девятого пятилетних планов значительно выросло холодильное хозяйство, и возросла его роль в экономике страны. В настоящее время по емкости холодильников наша страна занимает третье место в мире после США и Японии. К началу 1980 г. емкость холодильников составила свыше 6 млн. т.

На рост холодильной емкости оказывает влияние значительное развитие мясной, молочной, рыбной и пищевой промышленности. Происходит повышение технического уровня холодильных предприятий, температуры хранения продуктов понижаются до (—25)—(—30)° С, внедряются насосные схемы, расширяется применение воздушного охлаждения, применяются новые высокоэффективные теплоизоляционные материалы, находят применение высокоэффективные системы охлаждения и замораживания продуктов, высокоэффективные аппараты для совершения этих процессов.

Серьезные успехи сделало за последние годы отечественное машиностроение. Разработаны и выпускаются новые типы современных многооборотных вертикальных компрессоров, работающих как на аммиаке, так и на хладонах (фреонах). Освоен выпуск винтовых маслозаполненных компрессоров, производятся турбокомпрессоры и турбокомпрессорные агрегаты, работающие на аммиаке, хладоне-12, пропане и этилене. Серийно выпускаются крупные бромистолитиевые абсорбционные холодильные машины.

Большое развитие получил холодильный транспорт: железнодорожный, водный и автомобильный. На наших железнодорожных путях эксплуатируются поезда, секции и вагоны с механическим охлаждением, на речных и морских путях курсирует большое количество судов-холодильников, рыбная промышленность обогатилась большим количеством крупных промысловых судов, оснащенных современными средствами холодильной обработки. Практически полностью оснащена холодильным оборудованием государственная торговля. Значительно увеличилось производство домашних (бытовых) холодильников.

В десятой пятилетке в результате роста сельскохозяйственного производства выпуск продукции пищевых отраслей промышленности возраст на 23—25% по сравнению с 1975 г. Для сохранения и обработки все возрастающего количества пищевых продуктов планируется рост холодильной емкости за пятилетку в 1,3 раза. Большие задачи придется выполнить за этот период в химической промышленности: при общем росте объема промышленного производства на 35—39% выпуск продукции химической и нефтехимической промышленности увеличится на 60—65%. Производство пластических масс и смол возрастет в два раза, в 1,5 раза увеличится производство синтетического каучука. Существенно увеличится и добыча естественного газа. Значительно возрастут и другие отрасли народного хозяйства страны, в которых искусственный холод играет важную роль. Все это вызовет новый большой рост холодильного хозяйства в стране.

Большую роль в выполнении поставленных задач будет играть дальнейшее техническое перевооружение нашей промышленности (в том числе и путем реконструкции предприятий), обеспечивающее необходимый рост производительности труда, всемерный рост эффективности общественного производства, улучшения качества продукции. перевооружение холодильных предприятий идет по трем главным направлениям: 1) интенсификации холодильного оборудования и технологических процессов; 2) комплексной механизации и автоматизации погрузочно-разгрузочных работ; 3) комплексной автоматизации производственных процессов. Особое внимание уделяется повышению эффективности производства искусственного холода и его применению в разных областях промышленного производства.

Все это требует дальнейшего повышения качества подготовки специалистов. Авторы надеются, что настоящая книга будет содействовать решению поставленных задач. Главы 1—12 написаны Е. С. Курылевым, а главы 13—15 — Н. А. Герасимовым,

Первое издание книги вышло в 1961 г., второе — в 1970 г. В новом издании часть глав существенно переработана.

### § 1.1. ТИПЫ ХОЛОДИЛЬНИКОВ И ИХ ОСОБЕННОСТИ

Холодильник — это промышленное предприятие, предназначенное для охлаждения, замораживания и хранения скоропортящихся продуктов. Холодильники имеют характерные особенности.

1. В них обрабатываются и хранятся ценные и довольно скоропортящиеся продукты, требующие для своего сохранения поддержания температур ниже температуры наружной окружающей среды и определенной относительной влажности, а в некоторых случаях — циркуляции воздуха и определенного воздухообмена или даже определенного состава газовой среды (например, при хранении фруктов в среде с повышенным содержанием двуокиси углерода или другого газа).

2. Теплота и влага наружного воздуха стремятся проникнуть в холодильник, что требует создания специальных конструкций ограждений для уменьшения проникновения теплоты и влаги внутрь помещений.

3. Большой объем перемещаемых грузов, и необходимость быстрой их разгрузки требуют широкого применения транспортных устройств.

4. К ним предъявляются высокие санитарные требования.

Холодильники можно классифицировать по различным признакам. Каждый тип холодильника имеет свои особенности, которые приходится учитывать при проектировании и эксплуатации. Прежде всего, холодильники различаются по целевому назначению. Эта классификация наиболее полно отражает особенности работы холодильников и их оборудования. Наличие разнообразных холодильных предприятий отвечает задачам осуществления непрерывной холодильной цепи, под которой понимают совокупность холодильников различных типов и организацию взаимной связи между ними, благодаря которой пищевые продукты, начиная с момента производства и кончая потреблением, находятся под постоянным воздействием низких температур, что обеспечивает высокое качество продуктов даже при длительном их хранении. Отдельные типы холодильников являются, таким образом, звеньями непрерывной холодильной цепи. В соответствии с этим различают следующие типы холодильников.

*Производственные холодильники*, которые предназначены для первичной термической обработки (охлаждения и замораживания) пищевых продуктов и находятся в районах производства или заготовки продуктов. Они могут быть цехом какого-либо пищевого предприятия (мясокомбината, молочного комбината и т. п.) или самостоятельным предприятием в месте заготовки, например, рыбы (рыбные заготовительные) или птицы, яиц (птично-яичные) и другой продукции сельского хозяйства. Холодильники этого типа характеризуются большой производительностью устройств для охлаждения и замораживания при относительно небольшом объеме помещений для хранения продуктов. В связи со значительной производительностью замораживающих устройств производственные холодильники имеют холодильное оборудование большой мощности для низких температур кипения.

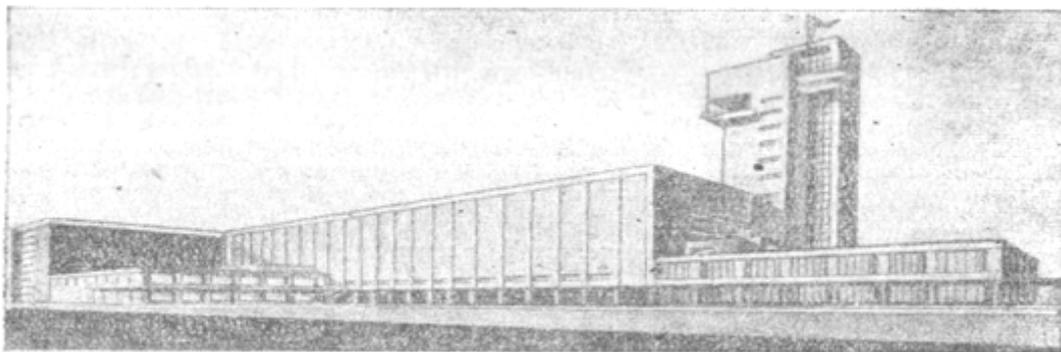


Рис. 1.1 Холодильник Ленинградского мясокомбината.

Работа холодильников этого типа характеризуется большей частью резкой неравномерностью, объясняющейся сезонностью заготовок пищевых продуктов. На рис. 1.1 показан внешний вид холодильника Ленинградского мясокомбината.

*Базисные холодильники* предназначены для долгосрочного хранения продуктов, поступающих из производственных холодильников, с целью создания резервов. Эти холодильники обычно имеют большую емкость помещений для хранения продуктов и малую производительность устройств для охлаждения и замораживания. На таких холодильниках предъявляются повышенные требования к поддержанию постоянства температурного и влажностного режимов в охлаждаемых помещениях.

*Портовые холодильники* служат для краткосрочного хранения грузов при их перегрузке с одного вида транспорта на другой, например с водного на железнодорожный транспорт и т. п. Строятся такие холодильники в речных или морских портах. Для них характерны большие объемы грузовых операций, операций по осмотру и сортировке продуктов, для чего предусматриваются специальные помещения. Особенно высока, должна быть степень механизирования грузовых работ, в частности для погрузки и разгрузки судов.

*Распределительные холодильники* предназначены для равномерного обеспечения городов и промышленных центров сезонными продуктами питания в течении всего года. Так же, как и базисные холодильники, характеризуются относительно большой вместимостью помещений для хранения продуктов. Выпуск грузов осуществляется сравнительно равномерно, холодильники часто имеют производственные цехи: производства мороженого, водного льда, твердой двуокиси углерода (сухого льда), фасовки мяса, масла и др. Такие предприятия называют хладокомбинатами. На рис. 1.2 показан распределительный одноэтажный холодильник.



**Рис. 1.2** Распределительный одноэтажный холодильник.

*Торговые холодильники* служат для кратковременного хранения продуктов на торговых базах, в магазинах, столовых, ресторанах и т. п. Характерными для этого типа холодильников являются повышенные температуры хранения и менее строгие требования в отношении поддержания постоянных условий хранения. К этой же группе холодильных установок относятся также устройства для текущего хранения продуктов в торговой сети.

*Транспортные холодильники* предназначены для создания необходимых низкотемпературных условий перевозки продуктов на разнообразных средствах транспорта. Различают железнодорожный, водный, автомобильный и авиационный холодильный транспорт, а также холодильные контейнеры. Все эти виды холодильных устройств являются связующими элементами между отдельными звеньями непрерывной холодильной цепи. Транспортные холодильники могут предназначаться и для производственных или заготовительных целей. Так, например, имеются промысловые суда, на которых производится

замораживание рыбы, передвижные устройства на автомобилях для замораживания ягод и т. п.

*Домашние (бытовые) холодильники* служат для кратковременного хранения продуктов в домашних условиях и для производства небольшого количества льда. Они являются последним звеном непрерывной холодильной цепи.

Приведенная классификация холодильников в степени условна, так как иногда функции холодильников могут меняться или сочетаться. Так, портовый холодильник может выполнять функции и распределительного холодильника, обеспечивая текущее потребление района, в котором он расположен. Эти же функции может выполнять производственный холодильник. Однако каждому предприятию свойственна основная функция, которая позволяет отнести его к определенному типу.

Различные холодильники могут сравниваться друг с другом по объему или емкости камер хранения, а также по производительности помещений или устройств для термической обработки (охлаждения или замораживания). В зарубежной практике размер холодильников обычно характеризуют объемом камер хранения в кубических метрах. В СССР размер холодильников принято оценивать емкостью в тоннах (кроме домашних холодильников, размер которых

определяют по пиленому объему в кубических дециметрах, а также торгового холодильного оборудования и других малых установок, объем которых измеряют в кубических метрах). Емкость холодильника определяется количеством груза в тоннах, которое может одновременно храниться в грузовом объеме холодильника. Так как в одном и том же объеме помещения можно разместить неодинаковое количество различных продуктов (в соответствии с их объемной массой), то для сравнения холодильников между собой приходится вводить понятие об условной емкости помещений (или емкости по условному грузу), под которой понимают емкость холодильника при загрузке его мороженым мясом. По *величине условной емкости* холодильники подразделяются на малые, имеющие емкость до 500 т, средние — до 5000 т и крупные — свыше 5000 т.

Другой характеристикой величины холодильника является производительность оборудования для осуществления основных технологических процессов: охлаждения и замораживания (а иногда и размораживания). Производительность (производственная мощность, пропускная способность) определяется количеством тонн продуктов, обрабатываемых в единицу времени (т/ч, т/смену, т/сут). Можно считать для пищевых предприятий производительность помещений или оборудования для замораживания до 20 т/сут — малой, до 100 т/сут — средней и свыше 100 т/сут — крупной. Емкость производственных помещений обычно не включается в общую емкость холодильника.

Холодильники по виду производственного здания классифицируются на многоэтажные и одноэтажные.

Средние и крупные холодильники раньше обычно выполнялись в виде *многоэтажных зданий* (до пяти-шести этажей). Такая форма возникла из желания уменьшить наружную поверхность здания и тем самым способствовать уменьшению теплопритоков через наружные ограждения. Однако в многоэтажных зданиях затрудняется механизация грузовых работ, ограничивается возможность применения современных механизмов для транспортировки и укладки грузов.

*Одноэтажные* холодильники были обычной формой малых холодильников. В настоящее время за рубежом и у нас ведется строительство одноэтажных холодильников любой емкости, вплоть до очень большой. Современные одноэтажные холодильники строятся значительно большей высоты (до 10—12 м), чем обычная высота этажа многоэтажного холодильника (4,2; 4,8 и редко 6 м), так как нагрузка на пол одноэтажного холодильника может быть значительно больше, чем нагрузка на междуэтажное перекрытие многоэтажного холодильника. Строительные конструкции одноэтажного холодильника легче (а следовательно, и дешевле), так как они не несут нагрузки от уложенных грузов. Одноэтажный холодильник по этой же причине может быть построен в два-три раза быстрее, что позволяет ускорить развитие сети холодильников. Важное достоинство одноэтажных холодильников — широкая возможность комплексной механизации грузовых работ, в результате чего не только облегчается труд рабочих, но и значительно уменьшаются затраты ручного труда и стоимость проведения грузовых работ. В зарубежной практике новые холодильники строятся, как правило, одноэтажными. В нашей стране им отдается предпочтение при емкости до 10 000 т.

В последнее время началось строительство одноэтажных холодильников высотой от 20 до 40 м. На таких холодильниках погрузочно-разгрузочные операции не только механизированы, но и автоматизированы; в некоторых случаях механизмами, выполняющими грузовые работы, управляет ЭВМ, запоминая место, где уложена каждая партия груза, и при необходимости обеспечивающая выдачу продуктов именно требуемой партии. На одном из крупных высотных американских холодильников (в г. Солоне, высота холодильника 36,5 м, площадь 1700 м<sup>2</sup>) все грузовые работы выполняют два оператора.

В СССР и других странах имеются холодильники со своеобразными строительными конструкциями так называемые подземные холодильники. Для постройки таких холодильников используют главным образом естественные пещеры и горные выработки, например, в известковых, мраморных и других карьерах. Большая толщина ограждений (обычно несколько метров) позволяет отказаться от применения изоляционных материалов для уменьшения теплопритоков. Благодаря этому, а также тому, что обычно используются уже в значительной степени готовые помещения, строительство подземных холодильников обходится дешевле строительства наземных. От уменьшения теплопритоков внутрь помещений, хорошо защищенных ограждениями большой толщины, существенно сокращаются и эксплуатационные затраты.

Особенностью работы подземных холодильников является необходимость в длительном подготовительном периоде, нужном для промораживания (охлаждения) ограждений, после чего образовавшаяся мерзлотная зона является мощным аккумулятором холода, способствующим поддержанию устойчивого температурного рема в помещениях.

## § 1.2. УСТАНОВЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВОЗДУХА В ОХЛАЖДАЕМЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ

Холодильные установки любой отрасли промышленности в зависимости от характера технологического процесса могут быть двух видов: 1) технологический процесс предусматривает непрерывное понижение температуры охлаждаемого объекта от начальной температуры до необходимой конечной (охлаждение и замораживание продуктов, охлаждение воздуха в помещениях и жидкостей в аппаратах); работа таких холодильных установок осуществляется в условиях нестационарного теплового состояния; 2) технологический процесс требует поддержания постоянных параметров охлаждаемой среды, для того чтобы при этих условиях осуществлялись химические реакции или хранились вещества, требующие постоянства параметров в аппаратах и в охлаждаемых помещениях для сохранения их качества; такие установки работают в условиях стационарного теплового состояния.

Так, в охлаждаемых помещениях холодильных установок второго вида должны устанавливаться и длительное время поддерживаться определенные параметры воздушной среды, отвечающие технологическим условиям обработки и хранения тех или иных продуктов, материалов, изделий, находящихся в данном помещении. К таким параметрам состояния воздуха внутри охлаждаемого помещения относятся прежде всего температура и влажность воздуха. При этом охлаждаемым помещением можно считать лишь такое, в котором поддерживается в определенных установленных пределах некоторая температура, более низкая, чем температура окружающей среды.

Третьим параметром воздушной среды является скорость движения воздуха. Кроме этого, в ряде случаев приходится очищать воздух помещения от механических и бактериальных загрязнений, запаха, а также поддерживать определенный состав газовой среды.

**Равновесная температура воздуха в охлаждаемом помещении.** Для понижения температуры воздуха в закрытом помещении (аппарате) и поддержания ее на заданном уровне помещение (аппарат) необходимо охлаждать, т. е. отводить из него теплоту, например, с помощью холодильной машины. С момента понижения температуры помещения (аппарата)  $t_{nm}$  в него начинает проникать теплота из окружающей среды, возникают и другие теплопритоки. Скорость изменения температуры  $t_{nm}$  прямо пропорциональна разности между теплопритоком  $Q_T$  в - помещение (количеством теплоты в джоулях, проникающим в помещение и выделяющимся в нем в единицу времени, например в секунду) и теплоотводом  $Q_0$  из него (холодильной мощностью в ваттах испарителя холодильной машины или установленных в помещении охлаждающих приборов) и обратно пропорциональна коэффициенту тепловой емкости  $C$  объекта

$$(1.1) \quad dt_{nm}/d\tau = (Q_T - Q_0)/C$$

Здесь коэффициент тепловой емкости  $C$  (Дж/К) представляет собой количество теплоты, которое нужно подвести к объекту или отвести от него, для того чтобы изменить температуру помещения (аппарата) на 1 К.

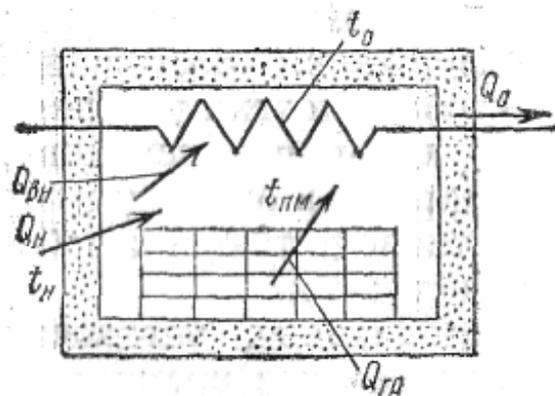
Равенству  $dt_{nm}/d\tau = 0$  соответствует наступление равновесия между теплопритоком и теплоотводом, характеризуемое уравнением теплового баланса

$$(1.2) \quad Q_T = Q_0,$$

и самоустановление определенной температуры воздуха  $t_{nm}$  в охлаждаемом помещении (или любой среды в охлаждаемом аппарате),, называемой *равновесной температурой*. Уравнение теплового баланса, включающее теплопритоки от различных источников при стационарном режиме, может иметь следующий вид:

$$(1.3) \quad Q_H + Q_{ГР} + Q_{ВН} = Q_0,$$

где  $Q_H$  — теплоприток через ограждения;  $Q_{гр}$  — теплоприток от обрабатываемых грузов;  $Q_{вн}$  — теплоприток от источников, расположенных внутри помещения (от людей, от осветительных приборов, от двигателей и т. п.).



**Рис. 1.3. Схема теплового баланса охлаждаемого помещения**

Схема теплового баланса охлаждаемого помещения показана на рис. 1.3. Такое равновесие, однако, является временным, преходящим. Холодильные установки работают при переменных внешних условиях, т. е. неизменно выводятся из состояния равновесия. Если теплоприток  $Q_T$  становится больше теплоотвода  $Q_0$ , то это вызывает повышение температуры  $t_{пм}$ . Если же теплоприток оказывается меньше теплоотвода, то результатом такого, неравенства будет понижение температуры в помещении. В связи с этим важно знать, как ведет себя данная система, будучи выведенной, из состояния равновесия. Для простоты рассуждения можно считать, что в охлаждаемое помещение проникает теплота от единственного источника — только через наружные ограждения. С этой же целью расчет ведется по зависимости стационарного режима. Количество теплоты (Дж), проникающее через ограждения в единицу времени,

$$(1.4) \quad Q_T = Q_H = k_H F_H (t_n - t_{пм})$$

где  $k_H$  — коэффициент теплопередачи ограждения;  $F_H$  — площадь поверхности ограждений;  $t_n$  — температура наружного воздуха.

С другой, стороны, секундное количество теплоты (Вт), отводимое охлаждающими приборами, определяется выражением

$$(1.5) \quad Q_0 = k_0 F_0 (t_{пм} - t_0),$$

где  $k_0$  — коэффициент теплопередачи охлаждающих приборов;  $F_0$  — площадь поверхности охлаждающих приборов;  $t_0$  — температура охлаждающей среды (если пренебречь термическими сопротивлениями внутренней теплоотдачи и стенок трубы, ее можно принять равной температуре поверхности охлаждающих приборов). Тогда, согласно выражению (1.2),

$$(1.6) \quad k_H F_H (t_n - t_{пм}) = k_0 F_0 (t_{пм} - t_0),$$

Если внешние условия изменились, например, повысилась температура наружного воздуха, то это вызовет возрастание теплопритока  $Q_T$ , как следует из выражения (1.4), и его превышение над теплоотводом  $Q_0$ , в результате чего произойдет повышение температуры воздуха в помещении. Последнее, в свою очередь, вызывает рост теплоотвода, характеризуемого выражением (1.5), Но повышение температуры воздуха  $t_{пм}$  будет замедлять рост теплопритока через ограждения до тех пор, пока теплоприток не сравняется с растущим теплоотводом (т. е. возрастающей производительностью испарителя) при новом значении температуры  $t_{пм}$ .

Такое самовыравнивание температуры охлаждаемого помещения (объекта) не всегда решает задачу регулирования, этого параметра. Величина саморегулируемого параметра может выйти за установленные в данном случае пределы, и для ее сохранения внутри этих, пределов надо располагать соответствующими средствами. Если из уравнения теплового баланса (1.6) найти величину равновесной температуры воздуха в помещении

$$(1.7) \quad t_{nm} = (k_H F_H t_H + k_0 F_0 t_0) / (k_H F_H + k_0 F_0)$$

то выражение (1.7) включает и величины, воздействуя на которые, можно добиться изменения температуры  $t_{nm}$ , в желаемом направлении. Поскольку в уравнении (1.1) регулирующим воздействием является: холодопроизводительность испарителя:  $Q_0$ , то для регулирования (вручную или: автоматически) температуры  $t_{nm}$  следует изменять величины, входящие в (1.5), т. е.  $k_0$ ,  $F_0$  и  $t_0$ . Изменяя скорость циркуляции воздуха (например, остановкой или пуском вентилятора), можно менять интенсивность теплообмена у охлаждающих приборов и, следовательно, величину  $k_0$ ; выключением части или всех охлаждающих приборов можно менять площадь их поверхности  $F_0$ . Несколько иначе влияет температура кипения  $t_0$ , прежде всего потому, что она в общем случае не постоянна и также саморегулируется при изменениях  $k_0$  и  $F_0$ . Иногда можно непосредственно изменять температуру  $t_0$ , например, увеличением или уменьшением холодильной мощности компрессора или при охлаждении помещения хладоносителем изменением его температуры (в этом случае температура поверхности охлаждающих приборов будет соответствовать не температуре кипения рабочего тела, а температуре хладоносителя).

Если в выражении (1.7) разделить все члены на  $k_0 F_0$ , то оно примет вид:

$$(1.8) \quad t_{nm} = \{ [k_H F_H / (k_0 F_0)] t_H + t_0 \} / \{ [k_H F_H / (k_0 F_0)] + 1 \}$$

При значительном превышении  $k_0 F_0$  над  $k_H F_H$ , т. е.  $k_0 F_0 \gg k_H F_H$ , равновесная температура  $t_{nm}$ , как это видно из выражения (1.8), будет стремиться к  $t_0$ . Аналогичным преобразованием можно показать, что при  $k_0 F_0 \ll k_H F_H$  равновесная температура воздуха будет стремиться к  $t_H$ . Таким образом, температура  $t_{nm}$  охлаждаемого помещения (объекта) может устанавливаться в пределах от температуры поверхности охлаждающих приборов  $t_0$  до температуры наружного воздуха  $t_H$ . Изменяя холодильную мощность  $Q_0$ , можно добиться установления в помещении температуры на желаемом уровне.

Наличие других (прочих) теплопритоков  $Q_{np}$  в охлаждаемое помещение не вносит качественных поправок в приведенные выводы. Равновесная температура в этом случае может быть определена по выражению, аналогичному (1.7),

$$(1.7a) \quad t_{nm} = (k_H F_H t_H + k_0 F_0 t_0 + Q_{np}) / (k_H F_H + k_0 F_0)$$

Так как теплопритоки  $Q_{np}$  являются внешними возмущениями, то и их влияние будет компенсироваться изменением  $Q_0$ .

**Равновесная относительная влажность воздуха в охлаждаемом помещении.** Относительная влажность воздуха  $\phi_{пм}$  в охлаждаемом помещении самоуставливается под действием баланса влаги, т. е. в результате стремления к равенству между влагопритоком  $W_{np}$  в помещение и влагоотводом  $W_0$  из него. Скорость установления относительной влажности

$$(1.9) \quad d\phi_{пм}/d\tau = (W_{np} - W_0)/D,$$

где  $D$  — коэффициент емкости помещения по количеству влаги, представляющий собой количество влаги (кг), которое нужно подать в помещение или отвести из него для того, чтобы изменить влажность воздуха на единицу (например, на 1% относительной влажности). При установившемся состоянии, т. е. при постоянной относительной влажности,

$$(1.10) \quad d\phi_{пм}/d\tau = 0 \quad \text{и} \quad W_{np} = W_0$$

Один из важнейших влагопритоков — испарение влаги с поверхности продуктов (усушка)  $\Delta G$ . Кроме того, влагопритоки  $W$  могут быть от разных источников, в частности, при подаче влаги регулятором влажности. Влагоотвод  $W_0$  в охлаждаемом помещении осуществляется конденсацией водяного пара из воздуха на поверхности охлаждающих приборов. Следовательно, баланс влаги будет иметь вид

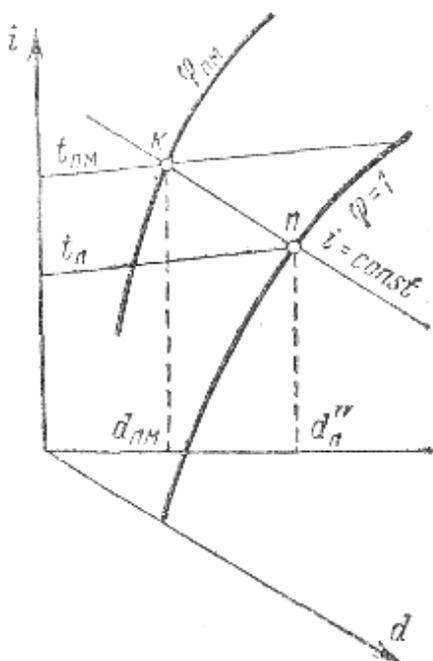
$$(1.11) \quad \Delta G + W = W_0$$

При всяких нарушениях влажностного баланса, связанных с изменениями влагопритока или влагоотвода, в системе, обладающей свойством саморегулирования, возникают процессы, стремящиеся восстановить равновесие, но при новом значении относительной влажности. Так, при увеличении влагопритока, например, из-за внесения в камеру теплых продуктов, левая сторона равенства (1.11) окажется больше правой. Это повлечет за собой увеличение влажности воздуха в помещении, а следовательно, и влагоотвода  $W_0$  до тех пор, пока вновь не будет достигнуто равновесие при некоторой повышенной влажности, которая и будет новой равновесной влажностью воздуха охлаждаемого помещения.

Количество влаги  $\Delta G$  (кг/с), теряемое продуктами, подчиняется закономерностям поверхностного испарения влаги

$$(1.12) \quad \Delta G = \beta_n F_n (p''_n - p_{nm})$$

где  $\beta_n$  — коэффициент испарения с поверхности продуктов,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Па})$ ;  $F_n$  — площадь поверхности продуктов,  $\text{м}^2$ ;  $p''_n$  — давление насыщенного водяного пара над поверхностью продуктов, Па;  $p_{nm}$  — парциальное давление водяного пара в воздухе охлаждаемого помещения, Па.



**Рис. 1.4. Состояния влажного воздуха в охлаждаемом помещении**

Численное значение коэффициента испарения для воды при свободном движении воздуха по Леви  $\beta_n = (89 \div 98) 10^{-10} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Па})$ , а для поверхности неупакованных продуктов (в частности, мяса)  $\beta_n = (65 \div 71) 10^{-10} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Па})$ .

При достаточно длительном хранении продуктов в помещении можно допустить, что температура их поверхности  $t_n$  за счет испарения влаги понижается ниже температуры воздуха помещения  $t_{nm}$  приближается к температуре мокрого термометра. Состояния влажного воздуха в помещении и насыщенного воздуха над продуктом показаны в диаграмме  $i - d$  точками  $k$  и  $n$  (рис. 1.4). Тогда взаимосвязь между параметрами этих состояний можно получить из теплового баланса мокрого термометра, в соответствии с которым конвективная теплота, передаваемая от воздуха помещения, к единице поверхности продукта, целиком идет на испарение влаги с этой поверхности

$\alpha_n (t_{nm} - t_n) = \beta_n \Gamma (p''_n - p_{nm})$ , где  $\alpha_n$  — коэффициент теплоотдачи;  $\Gamma$  — теплота парообразования, Дж/кг.

В несколько преобразованном виде эта зависимость носит название психрометрической формулы

$$(1.13) \quad p''_n - p_{nm} = A(t_{nm} - t_n)$$

где  $A = \alpha_{\text{п}} (\beta_{\text{п}} \Gamma)$  - психрометрический коэффициент, зависящий от скорости движения воздуха. При барометрическом давлении  $10^6$  Па и скорости воздуха 4 м/с  $A = 66,6$ ; при скорости воздуха 0,8 м/с  $A = 73,5$ , при скорости воздуха примерно 0,1 м/с  $A = 13,3,3$ .

Так как  $\varphi_{\text{пм}} = p_{\text{пм}} / p''_{\text{пм}}$ , то  $\Delta G = \beta_{\text{п}} F_{\text{п}} (p''_{\text{п}} - \varphi_{\text{пм}} p''_{\text{пм}})$ ; (1.12a)

$$p''_{\text{п}} - \varphi_{\text{пм}} p''_{\text{пм}} = A(t_{\text{пм}} - t_{\text{п}}) \quad (1.13a)$$

Коэффициенты  $a$  и  $b$

Табл.1.1

Интервал температур, °C	$a$ , Па	$b$ , Па/К
0- (-10)	589,16	34,9
(-11)-(-20)	392,67	14,89
(-21)-(-30)	220,21	6,21

Зависимость (1.13a) позволяет выразить величину  $p''_{\text{п}}$  через параметры воздуха камеры.. Температура поверхности продуктов  $t_{\text{п}}$  связана с давлением насыщенного пара над этой поверхностью логарифмической зависимостью. Для упрощения решения и для получения ясного представления о качественных зависимостях процессов установления и регулирования влажности можно принять для небольшого интервала температур (в пределах 10 К) приближенную линейную зависимость между давлением и температурой: насыщенного водяного пара, т. е. считать

$$(1.14) \quad p'' = a + bt,$$

где  $a$  и  $b$  — коэффициенты, постоянные в данном интервале температур; численные значения их приведены в табл. 1.1,

При замене температуры в уравнении (1.13a) давлением насыщенного пара, пользуясь зависимостью (1.14), можно получить

$$p''_{\text{п}} - \varphi_{\text{пм}} p''_{\text{пм}} = A (p''_{\text{пм}} - p''_{\text{п}}) / b,$$

откуда

$$p''_{\text{п}} = p''_{\text{пм}} (A + b \varphi_{\text{пм}}) / (A + b)$$

Найденное значение  $p''_{\text{п}}$  может быть подставлено в выражение

$$(1.15) \quad \Delta G = \beta_{\text{п}} F_{\text{п}} \{ [p''_{\text{пм}} (A + b \varphi_{\text{пм}}) / (A + b)] - \varphi_{\text{пм}} p''_{\text{пм}} \}$$

$$\Delta G = \beta_{\text{п}} F_{\text{п}} p''_{\text{пм}} [(1 - \varphi_{\text{пм}}) / M]$$

где  $M = 1 + b/A$  — коэффициент, для помещения с определенными температурой и скоростью движения воздуха он является постоянной величиной.

Выражение (1.15) показывает, что испарение влаги с поверхности продуктов уменьшается с возрастанием влажности воздуха и полностью прекращается в насыщенном воздухе при  $\varphi_{\text{пм}} = 1$ . Величина усушки зависит от температуры воздуха в помещении, поскольку  $\Delta G$  является функцией  $p''_{\text{пм}}$  и уменьшается с понижением температуры. Это одна из причин стремления к понижению температуры в помещениях для хранения продуктов. Естественно, что потеря влаги продуктами пропорциональна величине поверхности, с которой происходит испарение. Наконец, на величину усушки оказывает влияние интенсивность влагообмена, характеризуемая коэффициентом испарения  $\beta_{\text{п}}$ . Последний, так же как и коэффициент теплоотдачи, зависит от скорости движения воздуха, Вследствие этого усушка продуктов в единицу времени увеличивается при усилении циркуляции воздуха.

Количество влаги (кг/с), отводимое путем конденсации пара на охлаждающих приборах, определяется по выражению, аналогичному (1.12),

$$(1.16) \quad W_0 = \beta_0 F_0 (p_{\text{пм}} - p''_0) \text{ или } W_0 = \beta_0 F_0 (\varphi_{\text{пм}} p''_{\text{пм}} - p''_0)$$

где  $\beta_0$  — коэффициент конденсации пара на поверхности охлаждающих приборов;  $p''_0$  — давление насыщенного водяного пара над поверхностью охлаждающих приборов.

Влагоприток от прочих источников обычно невелик и величину  $W$  в уравнении (1.11) можно не расчленять на составляющие.

Используя выражения (1.15) и (1.16), можно написать уравнение влажностного баланса в виде

$$(1.17) \quad \beta_{\text{п}} F_{\text{п}} p''_{\text{пм}} [(1 - \varphi_{\text{пм}}) / M] + W = \beta_0 F_0 (\varphi_{\text{пм}} p''_{\text{пм}} - p''_0)$$

Из уравнения (1.17) определяется равновесная влажность воздуха охлаждаемого помещения

$$(1.18) \quad [\beta_{\text{п}} F_{\text{п}} + \beta_0 F_0 M (p''_0 / p''_{\text{пм}}) + WM / p''_{\text{пм}}] / (\beta_{\text{п}} F_{\text{п}} + \beta_0 F_0 M)$$

Для упрощения выражения (1.18) можно ввести следующие обозначения:

$$\beta_{\text{п}} F_{\text{п}} / \beta_0 F_0 = f(F) \text{ и } p''_0 / p''_{\text{пм}} = \varphi_0$$

Если величины  $\beta_{\text{п}}$  и  $\beta_0$  считать приблизительно постоянными и сравнительно немного отличающимися друг от друга, то  $f(F)$  будет представлять отношение площади поверхности продуктов к площади поверхности охлаждающих приборов. Физический смысл величины  $\varphi_0$  будет ясен из дальнейшего.

С учетом принятых обозначений выражение (1.18) может быть преобразовано, если его числитель и знаменатель разделить на  $\beta_0 F_0$

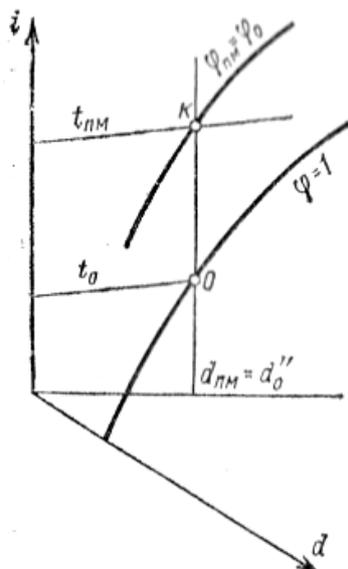
$$(1.19) \quad \varphi_{\text{пм}} = [f(F) + \varphi_0 M + WM / (\beta_0 F_0 p''_{\text{пм}})] / [f(F) + M]$$

Выражение (1.19) позволяет проанализировать ряд положений, полезных для рассмотрения условий установления влажности воздуха в охлаждаемых помещениях. Вначале следует рассмотреть простой случай, какой может быть при отсутствии каких-либо влаговыделений в помещении, кроме усушки продуктов, т. е. когда  $W = 0$ . Тогда равновесная влажность воздуха,  $\varphi_{\text{пм}}$ , связанная только с испарением влаги с поверхности продуктов, окажется равной

$$(1.20) \quad \varphi'_{\text{пм}} = [f(F) + \varphi_0 M] / [f(F) + M]$$

Как видно из уравнения (1.20), равновесная влажность  $\varphi'_{\text{пм}}$  зависит от соотношения между поверхностью продуктов и поверхностью охлаждающих приборов и от величины  $\varphi_0$ . Существенное значение имеют два случая, соответствующие минимальному и максимальному значениям  $f(F)$ .

1. Площадь поверхности охлаждающих приборов очень велика по сравнению с площадью поверхности продуктов, т.е.  $\beta_0 F_0 \gg \beta_{\text{п}} F_{\text{п}}$  и тогда  $f(F) \approx 0$ . Этим же характеризуется и незагруженное помещение, т.е. такое, в котором нет никаких продуктов. Но  $f(F)$  может быть равной нулю и при  $\beta_{\text{п}} = 0$ , т.е. при хранении неиспаряющихся грузов (или хорошо упакованных продуктов). В этом случае  $\varphi_{\text{пм}} = \varphi_0$ . Таким образом, оказывается, что  $\varphi_0$  - равновесная влажность охлаждаемого помещения, какая устанавливается при отсутствии в помещении влаговыделений. Так как при  $\varphi_{\text{пм}} = \varphi_0$  должно быть  $p_{\text{пм}} / p''_{\text{пм}} = p''_0 / p''_{\text{пм}}$ , то равенство парциальных давлений пара влечет за собой равенство влагосодержаний  $d_{\text{пм}} = d''_0$ . Это означает, что в диаграмме  $i - d$  влажного воздуха точка  $k$ , соответствующая состоянию воздуха в охлаждаемом помещении, будет лежать на линии постоянного влагосодержания, проведенной через точку  $o$ , характеризующую состояние насыщенного воздуха над поверхностью охлаждающих приборов (рис. 1.5). Можно сказать, что  $\varphi_0$  — самая низкая относительная влажность, которая может установиться в охлаждаемом помещении с температурой  $t_{\text{мн}}$  при температуре охлаждающей поверхности  $t_0$ .



**Рис. 1.5. Равновесная влажность воздуха охлаждаемого помещения при отсутствии влаговыделений**

2. Площадь поверхности охлаждающих приборов очень мала по сравнению с площадью поверхности продуктов, т. е.  $f(F) = \infty$ . В этом случае  $\varphi_{пм} = 1$ .

Применение зависимости (1.20) не ограничивается этими двумя случаями. Она позволяет анализировать не только условия установления равновесной влажности воздуха, но и ее изменения в желаемом направлении. Прежде всего можно утверждать, что величина равновесной относительной влажности воздуха устанавливается в пределах  $\varphi_0 \leq \varphi_{пм} \leq 1$ . При единственном источнике влагопритока — испарении влаги с поверхности продуктов, а также при постоянных температурах воздуха в помещении и поверхности охлаждающих приборов она зависит только от соотношения между поверхностью продуктов и поверхностью охлаждающих приборов. Чем меньше продуктов находится в охлаждаемом помещении, тем ниже будет в нем относительная влажность воздуха. При хранении упакованных продуктов величина коэффициента испарения для них будет мала по сравнению с коэффициентом конденсации на поверхности охлаждающих приборов. Это вызовет уменьшение  $f(F)$  и понижение влажности воздуха в помещении.

В случае необходимости удерживать относительную влажность на заданном уровне между  $\varphi_0$  и 1 по выражению (1.20) можно найти величины, на которые следует воздействовать для изменения относительной влажности в желаемом направлении; такими величинами являются  $f(F)$  и  $\varphi_0$ . Функция  $f(F)$  может менять свою величину при изменении не только  $F_0$  но и  $\beta_0$ . Величина же влажности  $\varphi_0$  зависит от температуры поверхности  $t_0$ . Таким образом, регулирование относительной влажности осуществляется при помощи тех же самых факторов, которые используются при регулировании температуры воздуха в охлаждаемом помещении, т. е. изменением площади поверхности охлаждающих приборов, скорости циркуляции воздуха и температуры охлаждающей среды; только в данном случае эти факторы вызывают изменение влагосодержания воздуха (количества влаги), увеличивая или уменьшая интенсивность испарения влаги с поверхности продуктов и интенсивность конденсации влаги на поверхности охлаждающих приборов. Такое «наложение» процессов затрудняет не только регулирование относительной влажности, но и температуры.

Особенностью процесса регулирования влажности воздуха в охлаждаемых помещениях является его практически постоянная односторонность, связанная с постоянным влагоотводом в результате непрерывной конденсации пара на охлаждающих приборах. По этой причине в подавляющем большинстве случаев требуется только увлажнять воздух помещения и повышать тем самым его относительную влажность. В тех же случаях, когда требуется понижение влажности, осушать воздух можно теми средствами, какие вытекают из зависимости (1.20): понижением температуры поверхности, увеличением площади охлаждающей поверхности (при

той же ее температуре) и интенсификацией процесса влагообмена (увеличением), например, при повышении скорости движения воздуха.

Увлажнение воздуха может осуществляться не только вышеуказанными средствами, но и подачей количества влаги  $W$  в помещение в соответствии с зависимостью (1.19). Влага в помещение может подаваться в виде водяного пара или капельной воды, распыляемой в форсунках. Процесс подмешивания водяного пара к влажному воздуху осуществляется примерно по изотерме, т. е. увлажнение воздуха паром вызывает лишь небольшое повышение температуры воздуха помещения, в то время как процесс подмешивания капельной воды протекает почти по изотермалпе, т. е. при этом возможно небольшое понижение температуры воздуха.

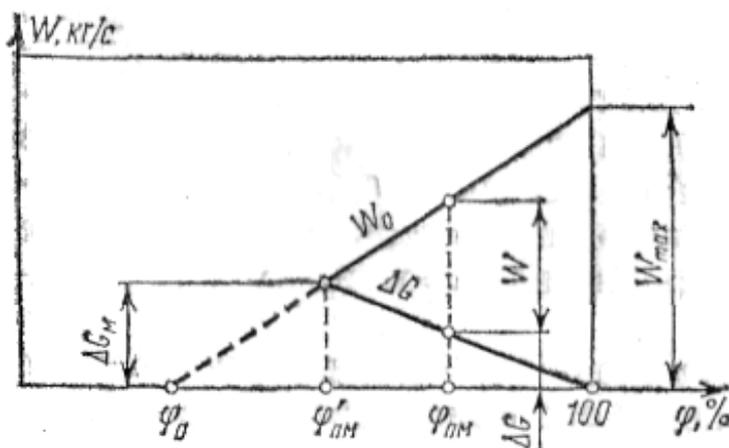
Выражение (1.19) учетом (1.20) может быть написано следующим образом:

$$\varphi_{\text{пм}} = \varphi'_{\text{пм}} + WM / \{ p''_{\text{пм}} \beta_0 F_0 [ f(F) + M] \}$$

Отсюда количество подаваемой влаги для удержания заданной влажности  $\varphi_{\text{пм}}$  будет

$$(1.21) \quad W = (\varphi_{\text{пм}} - \varphi'_{\text{пм}}) p''_{\text{пм}} \beta_0 F_0 [ f(F) + M] / M$$

Выражение (1.21) позволяет предотвратить возможный неправильный вывод из баланса влаги (1.11). Можно предположить, что для прекращения усушки  $\Delta G$  в помещении для хранения продуктов при любой, даже очень небольшой влажности воздуха достаточно подавать в помещение такое же заменяющее количество водяного пара. Однако оказывается, что уменьшить усушку добавлением водяного пара в воздух можно только в том случае, если в помещении будет поддерживаться влажность воздуха  $\varphi_{\text{пм}}$ , более высокая, чем  $\varphi'_{\text{пм}}$ , так как значение  $W$  может быть положительным только при  $\varphi_{\text{пм}} > \varphi'_{\text{пм}}$ .



**Рис. 1.6** Изменение членов баланса влаги при увлажнении воздуха охлаждаемого помещения

Соотношение между составляющими баланса влаги для различной влажности воздуха  $\varphi_{\text{пм}}$  показано на рис. 1.6. При данной величине  $f(F)$ , т. е. при некотором отношении площадей поверхности продуктов и поверхности охлаждающих приборов, при заданной температуре помещения  $t_{\text{пм}}$  в помещении установится относительная влажность  $\varphi_{\text{пм}}$ . Ей соответствует максимальная в данных условиях усушка продуктов  $\Delta G_M$ . Если затем в воздух помещения подавать влагу, например водяной пар, то с ростом влажности воздуха уменьшается усушка продуктов. Хотя при росте влажности воздуха количество влаги, необходимое для насыщения воздуха, все уменьшается, количество впрыскиваемой влаги  $W$  растет из-за увеличивающегося выпадения конденсата на охлаждающих приборах.

Максимальное количество влаги (кг/с), необходимое для доведения воздуха до насыщенного состояния, будет получено из (1.21) при подстановке  $\varphi_{\text{пм}}$  из (1.20)

$$(1.22) \quad W_{\text{max}} = (1 - \varphi_0) p''_{\text{пм}} \beta_0 F_0$$

Из рис. 1.6 следует, что все это количество влаги будет конденсироваться на охлаждающих приборах. Если в помещении хранится груз, с поверхности которого не происходит испарения влаги, а заданная влажность воздуха  $\varphi_{\text{пм}}$  больше, чем  $\varphi_0$ , то для ее установления потребуется подача влаги в количестве

$$(1.23) \quad W = (\varphi_{\text{пм}} - \varphi_0) p''_{\text{пм}} \beta_0 F_0$$

Выражения (1.21)—(1.23) показывают, что количество влаги, подаваемой для увлажнения воздуха помещения, зависит не только от заданной влажности. Оно возрастает при повышении температуры воздуха, при увеличении площади поверхности охлаждающих приборов и повышении интенсивности влагоотдачи. Повышение влажности воздуха в помещении путем подачи в него влаги не требует увеличения площади поверхности охлаждающих приборов, однако при этом возрастет необходимая холодильная мощность компрессора и выпадение инея на охлаждающей поверхности, что оказывается серьезным недостатком этого метода. При достаточной мощности установки увлажнение воздуха путем подачи влаги не оказывает существенного влияния на температуру воздуха в помещении. Этим последний способ выгодно отличается от способов, рассмотренных выше.

## ГЛАВА 2

### ПЛАНИРОВКА ХОЛОДИЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

#### § 2.1. ОБЩИЙ ПОРЯДОК ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Проекты холодильных предприятий выполняются на основе общих положений, выработанных для упорядочения проектирования и строительства новых промышленных предприятий всех видов, реконструкции и технического перевооружения действующих предприятий.

Выполнение проектов поручается проектным организациям. При разработке проектов они должны обеспечить передовой техникой уровень и высокую экономическую эффективность проектируемых предприятий с тем, чтобы строящиеся и реконструируемые предприятия ко времени ввода их в действие были технически передовыми и имели высокие показатели по производительности труда и качеству продукции, а по условиям труда отвечали высоким требованиям.

В задачу проектирования входит создание такой технической документации, которая позволит воспроизвести в натуре предприятие, полностью отвечающее требованиям и условиям, поставленным перед этим предприятием.

Проектирование промышленного предприятия должно осуществляться на основе технико-экономического обоснования (ТЭО), подтверждающего экономическую целесообразность и хозяйственную необходимость проектирования и строительства (реконструкции) этого предприятия. Строительство или реконструкция предприятий имеет своей целью обеспечить выполнение перспективного плана развития отрасли. ТЭО подготавливается заказчиком (хозяйственной организацией) с привлечением проектной организации, которой будет поручено проектирование объекта.

При составлении ТЭО выбирается площадка для строительства предприятия и связанных с ним объектов. Место строительства предприятия выбирается в районе или пункте, установленном схемой развития и размещения отрасли промышленности, к которой относится новое предприятие, и схемой развития и размещения производительных сил по экономическим районам страны. В комплекс работ по выбору площадки, выполняемых проектной и изыскательской организациями, входят экономические расчеты и инженерные изыскания, позволяющие установить экономическую целесообразность и техническую возможность предполагаемого строительства в данном месте. Большое внимание при этом должно уделяться соблюдению законодательства по охране природы.

При выполнении ТЭО определяется ориентировочная стоимость строительства предприятий. ТЭО утверждается вышестоящей организацией по отношению к организации-заказчику.

На основе утвержденного ТЭО заказчик выдает проектной организации задание на проектирование. Проектная организация должна принимать непосредственное участие в разработке задания на проектирование. В нем излагаются требования и условия, которым должен отвечать проектируемый объект. В состав задания на проектирование промышленного предприятия включаются следующие данные: наименование предприятия; основание для проектирования (постановление Правительства или приказ вышестоящей, хозяйственной организации); вид строительства (новое, реконструкция, расширение); район, пункт и площадка для строительства; характеристика продукции, предполагаемой к выпуску предприятием; производительность или производственная мощность предприятия; основные источники снабжения предприятия сырьем, электроэнергией, водой, топливом; намеченная специализация и производственное кооперирование; возможность расширения предприятия в дальнейшем; объем капитальных вложений; требования по защите окружающей среды; срок строительства и очередность ввода производственных мощностей; наименование проектной и строительной организации. Задание на проектирование утверждается вышестоящей организацией.

Проектная организация — генеральный проектировщик — по каждому проектируемому предприятию назначает главного инженера проекта, который осуществляет организацию и руководство проектными и изыскательскими работами, координирует работу проектировщиков над всеми частями проекта (строительной, технологической, холодильной, энергетической и т. п.) и отвечает за сроки и качество работ на протяжении всего срока проектирования и строительства до освоения предприятием проектной мощности. Для выполнения инженерных изысканий, а также отдельных частей проекта генеральным проектировщиком могут привлекаться субподрядные специализированные организации.

Проектировщики обязаны: применять в проектах эффективные технологические процессы, высокопроизводительное оборудование, обеспечивающее наивысшую производительность труда и высокое качество продукции; правильно определять сметную стоимость оборудования и строительных работ; обеспечивать надежность и безопасность спроектированных конструкций, сооружений и безопасность условий труда. Оптимальные проектные решения в ряде случаев могут выбираться на основе вариантных проработок.

Проектирование предприятий, зданий и сооружений может вестись в две стадии или в одну. При двухстадийном проектировании стадиями проекта являются: 1) технический проект; 2) рабочие чертежи. При проектировании в одну стадию выполняется техно-рабочий проект.

Проектирование в две стадии допускается для крупных и сложных промышленных комплексов, а также для предприятий с новой неосвоенной технологией производства, при использовании головных образцов сложного технологического оборудования или при особо сложных условиях строительства. Как правило, же, для строительства технически несложных предприятий, зданий и сооружений разрабатывается техно-рабочий проект. В одну стадию проектируются объекты, для строительства которых предполагается использовать типовые проекты и повторно применяемые экономичные индивидуальные проекты.

На стадии технического проекта решаются основные вопросы проекта, такие, как разработка генерального плана территории предприятия, разработка технологического процесса, расчеты и выбор оборудования, автоматизация производственных процессов, обеспечение сырьем, материалами, энергией, обеспечение производства кадрами, организация и экономика производства, а также технико-экономические показатели. Все технические расчеты производятся с возможной полнотой и с обязательным обоснованием выбранных решений. Кроме того, на основе выполнения сметы определяется стоимость строительства. Законченный технический проект рассматривается и утверждается.

В соответствии с утвержденным техническим проектом выполняется вторая стадия проекта — рабочие чертежи. Они позволяют воспроизвести в натуре проектируемый объект во всех его деталях. Рабочие чертежи дают конструктивные решения, обеспечивающие прочность, надежность и долговечность работы зданий и оборудования. На этой стадии производится уточнение и детализация предусмотренных техническим проектом решений в той степени, в которой это необходимо для производства строительных и монтажных работ. В то же время запрещается излишняя детализация; предлагается не повторять чертежи типовых конструкций и решения, а также материалы нормативных документов.

В техно-рабочем проекте должны быть решены те же вопросы, что и при двухстадийном проектировании, но для сокращения объема проектных материалов и продолжительности проектирования в техно-рабочем проекте следует приводить только те чертежи, расчеты и другие данные, которых нет в типовых и в повторно применяемых проектах.

Число стадий проекта устанавливается в задании на проектирование. Установленный порядок проектирования позволяет с наименьшими затратами труда и времени выяснить возможность и целесообразность предполагаемого строительства, своевременно обнаружить возможные ошибки в решении основных вопросов проекта, отыскать наиболее экономичные и прогрессивные решения.

Большую роль в строительстве предприятий, зданий и сооружений играют типовые проекты. Разработка типовых проектов имеет целью обеспечить строительство массовых или многократно повторяющихся однотипных предприятий готовыми проектными материалами, по которым строительные и монтажные работы должны осуществляться после необходимой привязки проекта к участку строительства, т. е. после внесения в проект сравнительно небольших изменений, связанных с местными условиями пункта, в котором осуществляется строительство.

Типовое проектирование включает разработку типовых проектов промышленных предприятий, цехов, зданий, сооружений с установлением, прежде всего определенной градации (ряда) производительности, объема или других основных показателей. Например, если разработаны типовые проекты одноэтажных распределительных холодильников с рядом емкостей на 300, 600, 1500, 3000, 5500, 10 000 и 15 000 т, то в дальнейшем распределительные холодильники следует строить только емкостью, равной одному из чисел этого ряда. Строительство холодильника емкостью, не отвечающей одному из чисел ряда, потребовало бы специального (индивидуального) проекта, а поэтому оказалось бы дороже и длительнее, чем по типовому проекту. Типовые проекты разрабатываются в одну или две стадии в зависимости от новизны или сложности объекта.

При типовом проектировании унифицируются типоразмеры многократно повторяющихся элементов и частей зданий, сооружений и создаются типовые секции, узлы и детали зданий и сооружений. Такая унификация упрощает и удешевляет не только проектирование, но и строительство, так как типовые элементы могут изготавливаться в массовом порядке на заводах с использованием механизированного и поточного производства. Такая организация проектных и строительных работ открывает широкие возможности для повышения их качества. Типовое проектирование, кроме того, включает разработку и использование типовых технологических процессов, что способствует унификации применяемого технологического оборудования, а также удешевляет и ускоряет проектирование. В связи с этим типовое проектирование имеет очень большие преимущества перед индивидуальным, а последнее может применяться только тогда, когда невозможно использование типовых проектов.

При применении типовых проектов запрещается их переработка. Возможно лишь внесение изменений в рабочие чертежи в связи с привязкой проекта к участку строительства. Такие изменения возникают, например, из-за иного характера грунта на данной строительной площадке по сравнению с тем, на какой велся расчет в типовом проекте; иных температурных условий на месте строительства по сравнению с принятыми в типовом проекте и т.п.

При выполнении любого объекта необходимо стремиться не только снизить стоимость строительства, но и создать условия для снижения стоимости единицы выпускаемой продукции и улучшения ее качества по сравнению с продукцией, производимой на аналогичных существующих предприятиях.

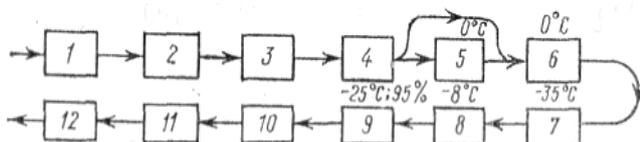
## **§ 2.2.**

### **СХЕМА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И ГРУЗООБОРОТ ХОЛОДИЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ КАК ОСНОВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ПРОЕКТА**

Планировкой предприятия называется размещение всех производственных и вспомогательных помещений как по горизонтали (в плане), так и по вертикали (по этажам). Чтобы выполнить это

размещение, необходимо знать назначение отдельных помещений, их количество и размеры. Основными исходными документами, позволяющими решить эту задачу, являются схема технологического процесса и грузооборот проектируемого предприятия.

Схема технологического процесса характеризует качественную сторону будущего предприятия; она определяет наличие и последовательность технологических операций, которые должны быть произведены над исходными продуктами, чтобы в конечном итоге были получены изделия заданного вида и необходимого качества. Для холодильных предприятий весьма важным является указание температуры и влажности воздуха, при которых происходит технологическая обработка продуктов на каждой из стадий технологического процесса. В качестве примера на рис. 2.1 приведена схема технологического процесса на производственном рыбном холодильнике. Как и на других холодильных предприятиях, здесь имеются операции, которые могут совершаться при положительных нефиксированных температурах (например, приемка, сортировка рыбы и мойка ее); операции, которые должны осуществляться при более или менее стабильных отрицательных температурах (например, замораживание), и операции, требующие поддержания не только стабильной отрицательной температуры, но и определенной влажности воздуха (например, хранение рыбы). Несомненно, что операции, требующие неодинаковых условий воздушной среды, должны выполняться в отдельных помещениях (аппаратах). Для операций, проводимых примерно в одинаковых условиях среды, не обязательно предусматривать отдельные помещения; этот вопрос решается в зависимости от объема работ, вида оборудования, технологических возможностей осуществления разнородных процессов в одном помещении. Технологический процесс в большинстве случаев не зависит от величины производительности предприятия, т. е. от количественного фактора; в некоторых случаях для небольших предприятий допускается лишь сокращение отдельных второстепенных операций или небольшое повышение температурного режима в охлаждаемых помещениях.

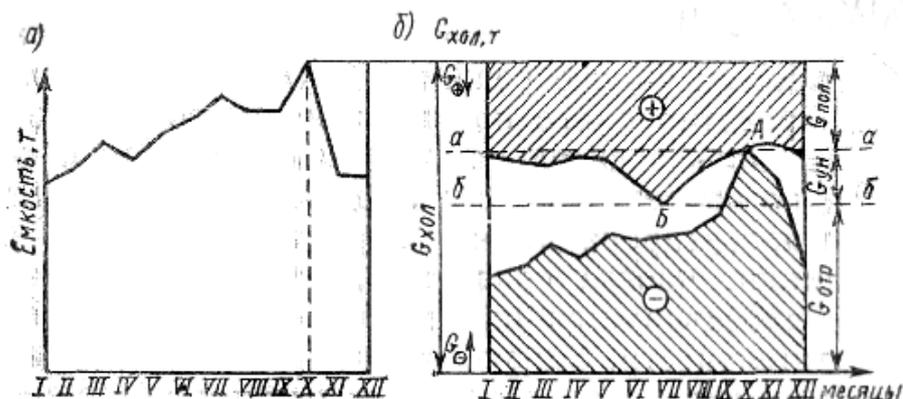


**Рис. 2.1** Схема технологического процесса на производственном рыбном холодильнике

Размеры проектируемого предприятия и его помещений определяются его производительностью (мощностью), которая при равномерном по времени выпуске продукции может быть указана в задании на проектирование; при неравномерном по времени выпуске продукции, иногда связанном, например, с сезонностью, предприятие проектируется на максимальную величину возможной производительности. Однако характер изменения самой производительности имеет особенности, которые приходится учитывать при проектировании. Например, для некоторых типов холодильников исходным документом, определяющим количественную сторону проектируемого предприятия, является таблица грузооборота. В этой таблице для каждого месяца года указывается месячное поступление на холодильник и выпуск из него всех продуктов, которые должны в нем обрабатываться и храниться. Обычно неравномерное поступление отдельных продуктов отражает сезонность их производства; для распределительных холодильников сравнительно равномерный выпуск продуктов связан с необходимостью равномерного снабжения населения пищевыми продуктами. Разница между поступлением и выпуском грузов указывает количество продуктов, оставшихся на хранение в холодильнике. Для первого месяца года должно быть учтено накопление продуктов во время сезона заготовки или производства данного продукта или остаток за предыдущий год в количестве, обеспечивающем потребности более или менее равномерного выпуска в течение всего года.

Количество хранящихся грузов (в тоннах условного груза) в каждом месяце показано на рис. 2.2, а. Максимальная ордината графика, соответствующая месяцу наибольшего количества одновременно хранящихся грузов (на рисунке октябрь месяц), определяет расчетную условную емкость холодильника  $G_{хол}$ . Продукты, хранящиеся в холодильнике, требуют различных температур хранения, в связи с чем общая емкость холодильника должна состоять из емкостей помещений разных температур. В рассматриваемом примере можно считать, что на холодильнике

будут помещения для мороженных продуктов, требующих для своего хранения отрицательных температур (обозначено знаком  $\ominus$ ), и помещения для охлажденных продуктов, требующих для своего хранения нулевых и положительных температур (обозначено знаком  $\oplus$ ). Примерные данные показаны на рис. 2.2, б. Своеобразие этого графика заключается в том, что емкость помещений с отрицательными температурами отсчитывается по оси ординат, как обычно, снизу вверх, в то время как емкость помещений с положительными температурами отсчитывается сверху вниз от оси абсцисс, расположенной от основания первого графика на расстоянии, равном общей емкости холодильника. При таком способе выполнения графика обе кривые должны соприкоснуться по крайней мере в одной точке А, соответствующей месяцу наибольшей необходимой (расчетной) емкости холодильника.



**Рис. 2.2** Изменение необходимой общей емкости холодильника и емкости камер для различных грузов по месяцам

Незаштрихованное поле между обеими кривыми характеризует емкость помещений, не занятых грузом. В случае, который показан на рисунке, максимальные емкости для грузов, хранящихся при положительной и отрицательной температуре, по времени не совпадают. В таком случае максимальные необходимые емкости этих двух групп помещений нельзя принимать в качестве расчетных, так как тогда потребовалось бы увеличение общей емкости холодильника, что повлекло бы за собой ухудшение использования его площади. На рис. 2.2, б такой выбор вызвал бы подъем всего графика емкости помещений с положительными температурами до тех пор, пока вершины графиков А и Б не окажутся на горизонтали *aa*. Это привело бы к значительному увеличению незаштрихованного поля графика. Более целесообразным является устройство универсальных помещений, в которых можно поддерживать, когда это нужно, или отрицательную, или положительную температуру. Если через вершину *Б* провести горизонтальную линию *bb*, то вся емкость холодильника окажется разделенной на три зоны: 1) от нижней оси абсцисс до линии *bb* (до максимума емкости положительных температур) — расчетная емкость помещений для отрицательных температур —  $G_{отр}$ ; 2) от оси абсцисс верхнего графика до линии *aa* (до максимума емкости отрицательных температур) — расчетная емкость помещений для положительных температур —  $G_{пол}$ ; 3) между линиями *aa* и *bb* (между максимумами емкости помещений отрицательных и положительных температур) - расчетная емкость универсальных помещений —  $G_{ун}$ . Тогда  $G_{хол} = G_{отр} + G_{пол} + G_{ун}$ .

Количество поступающих грузов, взятое из таблицы грузооборота, является исходной величиной для определения расчетной производительности помещений или устройств для охлаждения и замораживания этих грузов. Расчетная производительность помещений для обработки продуктов определяется по возможному максимальному поступлению грузов. Для этого в итоговых данных поступления всех грузов за различные месяцы находится наибольшее значение  $G_{\max \text{ мес. пост.}}$ . Максимальное суточное поступление (т/сут)

$$(2.1) \quad G_{\text{пост}} = (G_{\max \text{ мес. пост.}}/30) m_{\text{пост}}$$

где  $m_{\text{пост}}$  — коэффициент неравномерности поступления грузов, учитывающий возможные отклонения количества грузов, поступающих в отдельные дни, от среднемесячной величины суточного поступления;  $m_{\text{пост}} = 1,5 \div 2,5$ .

Какая часть поступающих грузов идет на охлаждение и замораживание, а какая непосредственно в камеры хранения — определяется типом холодильника, видом и состоянием прибывающих грузов и другими конкретными технологическими условиями работы проектируемого предприятия.

Аналогично может быть найдено максимально возможное количество грузов, выпускаемых ежесуточно с предприятия,

$$(2.2) \quad G_{\text{вып}} = (G_{\text{max мес. вып.}}/22) m_{\text{вып}}$$

где  $m_{\text{вып}}$  — коэффициент неравномерности выпуска; обычно выпуск грузов происходит с меньшей неравномерностью, вследствие чего  $m_{\text{вып}} = 1,1 \div 1,5$ .

Выпуск грузов с холодильников производится, как правило, только в рабочие дни; если же выпуск грузов предполагается производить и в выходные дни, то в знаменателе должно быть 30.

Наконец, для характеристики наибольшего объема погрузочно-разгрузочных работ имеет значение максимальная сумма поступающих и выпускаемых грузов (т/сут), которая обычно приходится на один из месяцев. В общем случае этот месяц может не совпадать ни с месяцем наибольшего поступления, ни с месяцем наибольшего выпуска грузов

$$(2.3) \quad G_{\text{max пост и вып}} = [(G_{\text{мес. пост}}/30) m_{\text{пост}} + (G_{\text{мес. пост}}/22) m_{\text{вып}}]_{\text{max. мес}}$$

В ряде случаев в распоряжении проектировщика может не быть таблицы грузооборота проектируемого предприятия, например при выполнении типовых проектов, однако при этом емкость предприятия  $G_{\text{хол}}$  может быть задана или определена по укрупненным показателям. Поступление и выпуск грузов в этом случае могут быть найдены по величине оборачиваемости  $B$ , которая определяется количеством оборотов сменяемых грузов в течение года. Для распределительных холодильников оборачиваемость  $B = (5 \div 6)$  1/год, для производственных она значительно больше и имеет величину примерно  $B = (10 \div 15)$  1/год. Однако для последних исходной величиной обычно бывает заданная суточная (или сменная) производительность по виду обрабатываемого продукта. Одноэтажные высотные холодильники, как показала практика их эксплуатации, могут быть рентабельными только при оборачиваемости, большей, чем 20 1/год.

При наличии известной величины оборачиваемости количество ежедневно поступающих грузов

$$(2.1 \text{ а}) \quad G_{\text{пост}} = (G_{\text{хол}} B/365) m_{\text{пост}}$$

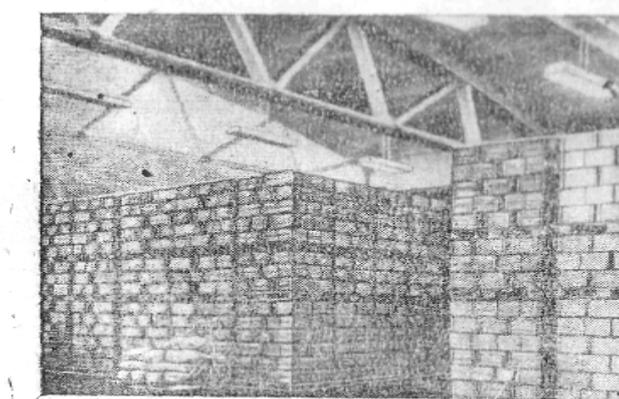
Количество ежедневно выпускаемых грузов

$$(2.2 \text{ а}) \quad G_{\text{вып}} = (G_{\text{хол}} B/365) m_{\text{вып.}}$$

### §2.3.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ ПОМЕЩЕНИЙ ХОЛОДИЛЬНИКА

Полученные выше данные емкости и производительности охлаждаемых помещений холодильника позволяют найти площадь и объем этих помещений. Размеры охлаждаемых помещений зависят также от способа размещения в них грузов. Груз в охлаждаемых помещениях может быть уложен в штабель; подвешен на подвесных путях или на крюках; уложен на полки стеллажей, этажерок, тележек и т.п.



**Рис. 2.3** Хранение груза, уложенного в штабель

Укладка груза в штабели применяется, главным образом, в помещениях (камерах) для хранения и иногда в помещениях для домораживания грузов. На рис. 2.3 показан штабель груза в охлаждаемом помещении. Груз уложен в штабель на поддонах, которые позволяют брать груз из штабеля пакетами при помощи механизмов (штабелеукладчиков, автопогрузчиков). Плотность укладки груза в штабель зависит от вида груза (его объемной массы), формы и вида тары в случае укладки упакованного груза.

Плотность укладки груза в охлаждаемых помещениях определяется нормой загрузки единицы объема  $g_v$  (кг/м<sup>3</sup> или т/м<sup>3</sup>) — табл. 2.1.

**Таблица 2.1** Значения  $g_v$  для некоторых продуктов

Вид груза	Норма загрузки, т/м <sup>3</sup>	Вид груза	Норма загрузки, т/м <sup>3</sup>
Говядина мороженая: <i>условный груз</i> <i>в полутушах</i> <i>в четвертинах</i>	0,35	Масло сливочное: <i>в деревянных ящиках</i>	0,70
	0,30	<i>в картонных ящиках</i>	0,80
	0,40	Птица в ящиках	0,38
Рыба мороженая: <i>в ящиках, корзинах</i> <i>картонных ящиках</i>	0,35	Яйцо	0,30
	0,60	Мясо мор-ое в блоках	0,60
		Свинина мороженая	0,45

Пользуясь нормой загрузки объема, можно определить грузовой объем  $V_{гр}$  (м<sup>3</sup>) помещения или группы однородных помещений, необходимый для размещения груза в количестве, соответствующем действительной (или условной) расчетной емкости  $G$  помещения,

$$(2.4) \quad V_{гр} = G/g_v$$

Эти же данные позволяют производить пересчет действительной емкости помещения (или всего холодильника) в условную и обратно, поскольку для каждого помещения неизменной величиной является его грузовой объем откуда

$$(2.5) \quad V_{гр} == G_{усл}/g_{v\text{ усл.}} = G/g_v$$

Грузовая площадь или площадь ( $m^2$ ), занимаемая штабелями,

$$(2.6) \quad F_{гр} = V_{гр} / h_{гр}$$

где  $h_{гр}$  — грузовая высота, м, под которой понимают высоту штабеля.

Высота штабеля прежде всего ограничивается строительной высотой помещения, причем по технологическим условиям считается необходимым, чтобы в предельном случае штабель не доходил до потолка или до низа балок на 0,2 м или на 0,3 м от потолочных охлаждающих приборов, а также от воздухопроводов, если они имеются в помещении. Высота штабеля ограничивается и прочностью перекрытия, на которое укладывается груз. Произведение  $g_v h_{гр}$  представляет собой нагрузку на  $1 m^3$  пола. При укладке штабеля на междуэтажное перекрытие необходимо, чтобы нагрузка на пол не превышала допустимой нагрузки для данного перекрытия  $g_{F\text{ доп}}$ . Т. е, чтобы  $g_v h_{гр} < g_{F\text{ доп}}$ .

Допустимая нагрузка на междуэтажные перекрытия в холодильниках постройки 1938—1941 гг. составляла  $1000 \text{ кг}/m^2$ . В современных холодильниках эта величина значительно выше и может быть  $2000 \text{ кг}/m^2$  при высоте этажа 4,8 м,  $2500 \text{ кг}/m^2$  при высоте этажа 5,4 м и  $3000 \text{ кг}/m^2$  при высоте этажа 6,0 м, что позволяет не только укладывать штабель достаточной, высоты, но и применять в охлаждаемых помещениях механизмы для укладки и транспортировки грузов, имеющие довольно высокую собственную массу. Только при укладке груза на пол, лежащий непосредственно на грунте, высота штабеля практически не ограничивается по соображениям прочности строительных конструкций, поскольку нагрузка па такой пол может составлять  $4000—5000 \text{ кг}/m^2$ , что является одним из важнейших достоинств одноэтажных холодильников.

В некоторых случаях высота штабеля может быть ограничена еще и прочностью тары, в которую упакованы продукты, так как при значительной высоте штабеля нагрузка на нижние ряды может казаться недопустимо большой. Тогда груз может укладываться, например, на полки деревянных или металлических стеллажей, а при хранении грузов на поддонах могут применяться поддоны с разгрузочными стойками, принимающими на себя нагрузку от верхних рядов штабеля. В высотных одноэтажных холодильниках груз, собранный в пакеты на поддонах, укладывается на полки стеллажей.

Однако не вся площадь помещения может быть занята штабелями грузов;. Часть, площади занимают колонны, а также отступы от стен и от охлаждающих приборов, имеющие ширину 0,3 м. Для доступа к штабелям и для проезда тележек или механизмов в помещении площадью свыше  $100 m^2$  оставляется один центральный проезд шириной 1,6 м. Указанные данные позволяют определить необходимую строительную площадь охлаждаемого помещения  $F_{стр} = F_{гр} + \sum F_{нгр}$ , где  $\sum F_{нгр}$  - сумма площадей участков, помещения, которые не могут быть полезно использованы.

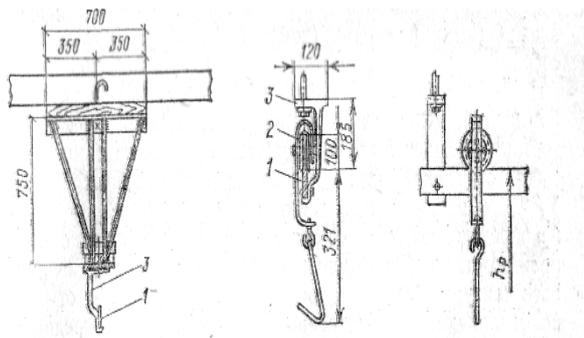
При ориентировочных расчетах строительную площадь помещения можно определить, пользуясь величиной коэффициента использования площади помещения  $\beta_F$ , который равен отношению грузовой (полезной) площади помещения к его строительной (полной) площади  $\beta_F = F_{гр} / F_{стр}$ , откуда

$$(2.7) \quad F_{стр} = F_{гр} / \beta_F$$

Коэффициент использования площади помещения  $\beta_F$  зависит от размеров помещения: чем больше помещение, тем относительно лучше оно может быть загружено. Примерные значения этого коэффициента:

Для малых помещений (от 20 до  $100 m^2$ ) \_\_\_\_\_ 0,65  
 - средних помещений (от 100 да  $400 m^2$ ) \_\_\_\_\_ 0,70  
 - крупных помещений (свыше  $400 m^2$ ) \_\_\_\_\_ 0,80

Груз в подвешенном состоянии на, подвесных путях может находиться и в помещениях для охлаждения или замораживания, и в помещениях для хранения. На подвесных путях, главным образом, размещается мясо в полутушах или четвертинах. На отечественных пищевых предприятиях принят однорельсовый подвесной путь, причем в качестве путевого рельса / (рис. 2.4) используется полосовая сталь 65 X 12 мм, которая при помощи подвесок 3 подвешивается или к балкам балочного каркаса, или к потолку. Расстояние между нитками подвесных путей обычно бывает 700—900 мм; высоту  $h_p$  верхней кромки рельса подвесного пути над полом принимают: для крупного рогатого скота 3,35 м (на распределительных холодильниках может быть 3,2 м); для мелкого скота — 2,0 м. Груз подвешивается на крюк каретки (троллея) 2, которая катится по рельсу. Перемещение груза может осуществляться вручную, на наклонных участках — гравитационно или же путем механической тяги при применении, например, цепных конвейеров.



**Рис. 2.4 Конструкция подвесного пути-**

Если груз находится в подвешенном состоянии, то определение необходимых размеров помещений ведется по норме нагрузки, отнесенной к 1 м<sup>2</sup> строительной площади данного помещения  $g_F$ . Для мяса эта норма  $g_F = 0,20 \div 0,35$  т/м<sup>2</sup>. Тогда строительная площадь помещения

$$(2.8) \quad F_{\text{стр}} = G / g_F$$

Для производственных помещений, для которых задана производительность  $G'$  (т/сут), учитывая, что емкость помещения  $G = G' \tau$  (где  $\tau$  — время термической обработки, сут), строительная площадь

$$(2.8 \text{ а}) \quad F_{\text{стр}} = G' \tau / g_F$$

Нагрузка, отнесенная к площади помещения, может быть уточнена, исходя из нормы загрузки подвесного пути. Так, считается, что на 1 м подвесного пути можно нагружать 250 кг. По этой норме определяется условная емкость помещений для хранения охлажденных продуктов (в частности, охлажденного мяса).

Норма нагрузки при размещении мелких грузов на полках напольных тележек, или подвесных этажерок 20—35 кг/м<sup>2</sup> площади полки. Обычно эта норма в конкретных условиях уточняется в зависимости от вида груза и от конструкции тележки или этажерки.

Кроме основных производственных помещений в составе предприятия предусматриваются вспомогательные помещения, необходимые для выполнения технологических операций, не связанных с термической обработкой (например, накопители грузов, помещения для сортировки, упаковки и т. п.), для выполнения операций, связанных с приемкой или отправлением грузов (экспедиции), для осуществления транспортных связей (коридоры, вестибюли, лестничные клетки и лифтовые шахты), для отделения друг от друга помещений с резко отличающимися тепловыми и влажностными режимами (например, тамбуры, представляющие собой тепловые и влажностные шлюзы). При проведении предварительных расчетов площадь, отводимую для вспомогательных помещений, можно учесть путем введения коэффициента использования площади всего предприятия  $\eta_{\text{хол}}$ , который представляет собой отношение площади всех производственных помещений  $\sum F_{\text{стр}}$  к площади  $F_{\text{хол}}$  всего холодильника:  $\eta_{\text{хол}} = \sum F_{\text{стр}} / F_{\text{хол}}$  и в определенной степени

является мерой полезного использования производственной площади предприятия в пределах изолированного контура. Величина этого коэффициента зависит от размеров холодильника, и естественно, что на крупных предприятиях относительная доля вспомогательных помещений меньше.

Коэффициент  $\eta_{\text{хол}}$  для малых холодильников 0,70—0,75; для средних — 0,75—0,85; для крупных — 0,85—0,90. Следовательно, общая площадь всех помещений холодильника

$$(2.9) \quad F_{\text{хол}} = \sum F_{\text{стр}} / \eta_{\text{хол}}$$

Площади некоторых вспомогательных помещений могут быть рассчитаны по нормам для этих помещений, а для других помещений уточняются при выполнении планировки.

Данные по максимальному суточному поступлению и выпуску грузов делают возможным определение длины грузового фронта предприятия, под которым понимают длину грузовых платформ, достаточную для того, чтобы обеспечить погрузку и разгрузку прибывающих на предприятие транспортных средств. В зависимости от типа холодильника и его местоположения приходится предусматривать возможность прибытия различных средств грузового транспорта, в связи с чем и строятся те или иные устройства. Для железнодорожного транспорта предусматривается железнодорожная платформа, для автомобильного — автомобильная платформа, для водного — причал (причальная линия). Для определения длины каждого из этих устройств все суточное количество прибывающих и выпускаемых грузов разбивается по транспортным средствам ( $G_{\text{жел}}$ ,  $G_{\text{авт}}$ ,  $G_{\text{вод}}$ ) в соответствии с долей их участия в этих операциях, т. е.

$$G_{\text{пост и вып}} = G_{\text{жел}} + G_{\text{авт}} + G_{\text{вод}}.$$

Число железнодорожных вагонов, которые будут прибывать на холодильник за сутки,

$n_{\text{ваг}} = G_{\text{жел}} / g_{\text{ваг}}$ , где  $g_{\text{ваг}}$  — грузоподъемность вагона. Длина железнодорожной платформы (м)

$$(2.10) \quad L_{\text{жел}} = n_{\text{ваг}} l_{\text{ваг}} m_{\text{п.в}} / \Pi$$

где  $l_{\text{ваг}}$  — полная длина вагона;  $\Pi$  — число подач вагонов в сутки, обычно  $\Pi = 1 \div 4$  в сутки;  $m_{\text{п.в}}$  — коэффициент неравномерности подачи вагонов за каждый раз по отношению к средней величине  $n_{\text{ваг}} / \Pi$ ; можно считать  $m_{\text{п.в}}$  до 1,5.

Современные четырехосные цельнометаллические вагоны-холодильники имеют среднюю грузоподъемность 25—30 т и длину около 20 м. Длина платформы должна округляться до значения, кратного длине вагона. Считается необходимым, чтобы холодильники емкостью болт; 3000 т имели длину железнодорожной платформы по менее 120 м для возможного приема пяти-вагонной железнодорожной секции.

Аналогично, число автомашин, которые должны прибывать за сутки,

$n_{\text{авт}} = G_{\text{авт}} / (g_{\text{авт}} \eta_{\text{исп.авт}})$ , где  $g_{\text{авт}}$  — грузоподъемность автомашины, среднее ее значение принимается 3 т;  $\eta_{\text{исп.авт}}$  — коэффициент использования грузоподъемности автомашины, можно считать  $\eta_{\text{исп.авт}} = 0,5 \div 0,7$ . Тогда длина автомобильной платформы

$$(2.11) \quad L_{\text{авт}} = n_{\text{авт}} b_{\text{авт}} \psi_{\text{пер}} \tau_{\text{авт}} m_{\text{авт}} / 8$$

где  $b_{\text{авт}}$  — ширина, кузова автомашины, включая промежуток между машинами при постановке их у платформы;  $b_{\text{авт}} = 3 \div 4$  м;  $\psi_{\text{пер}}$  — доля от общего числа машин, характеризующая количество машин, прибывающих в течение первой (дневной) смены; обычно эта доля от 0,6 до 1,0;  $\tau_{\text{авт}}$  — время загрузки или выгрузки одной автомашины; оно составляет 0,50—0,75 ч;  $m_{\text{авт}}$  — коэффициент неравномерности прибытия автомобилей по отношению к среднечасовому их количеству; можно считать  $m_{\text{авт}} = 1,0 \div 1,5$ . Длину автомобильной платформы следует округлять до значения, кратного ширине  $b_{\text{авт}}$ .

По тем же соображениям длина причала

$$(2.12) \quad L_{\text{вод}} = G_{\text{вод}} l_{\text{вод}} \tau_{\text{вод}} m_{\text{вод}} / (24 g_{\text{вод}})$$

Полученная длина грузового фронта холодильника помогает найти размеры здания в плане, заставляя, например, иногда вытягивать его в направлении одной из платформ, для того чтобы обеспечить нужную ее длину; в других случаях длина здания может быть признана просто

достаточной, если необходимая длина платформы оказывается короче стороны здания, к которой примыкает соответствующая платформа.

Количество механизмов, необходимых для производства погрузочно-разгрузочных работ, определяется в результате деления общего суточного объема работ на объем работы, который может быть выполнен одним механизмом за то же время (причем объем работы может выражаться, например, произведением количества перемещаемых грузов на время одной операции, включающее загрузку механизма, его движение к месту разгрузки, разгрузку и возвращение порожнего механизма обратно к месту загрузки). На многоэтажных холодильниках основными грузоподъемными механизмами для вертикального перемещения грузов являются лифты. Их число  $n_{\text{лифт}}$  определяется по максимальной сумме поступающих и выпускаемых грузов:

$$(2.13) \quad n_{\text{лифт}} = (G_{\text{пост. и вып.}} - G_{\text{I пост. и вып.}}) \tau_{\text{ц}} \psi_{\text{пер}} / (g_{\text{лифт}} \eta_{\text{исп. лифт}} 480)$$

где  $G_{\text{I пост. и вып.}}$  — количество грузов, поступающих в первый этаж и выпускаемых из него;  $\tau_{\text{ц}}$  — продолжительность цикла работы лифта, в предварительных расчетах она может быть принята 6—10 мин;  $\psi_{\text{пер}}$  — доля всего объема грузовых работ, выполняемая в течение первой смены; она составляет 0,5—0,7;  $g_{\text{лифт}}$  — грузоподъемность лифта; на средних холодильниках применяются лифты грузоподъемностью 2—3 т, на крупных 3—5 т;  $\eta_{\text{исп. лифт}}$  — коэффициент использования грузоподъемности лифта; обычно его значение 0,7—0,8.

Число других механизмов для производства грузовых работ (тележек, штабелеукладчиков, автопогрузчиков и т. п.) определяется подобным же путем

$$(2.14) \quad n_{\text{гр. мех}} = G_{\text{пост. и вып.}} \tau_{\text{ц}} \psi_{\text{пер}} 1,2 / (g_{\text{мех}} \eta_{\text{исп. мех}} 480)$$

где  $\tau_{\text{ц}}$  — продолжительность цикла работы механизма; в предварительных расчетах может быть принята также 6—10 мин;  $g_{\text{мех}}$  — грузоподъемность механизма; применяемые на холодильниках механизмы имеют грузоподъемность 0,75—1,5 т; 1,2 — коэффициент увеличения числа механизмов (обычно примерно 20% всех механизмов находятся на зарядке аккумуляторов, в осмотре и ремонте).

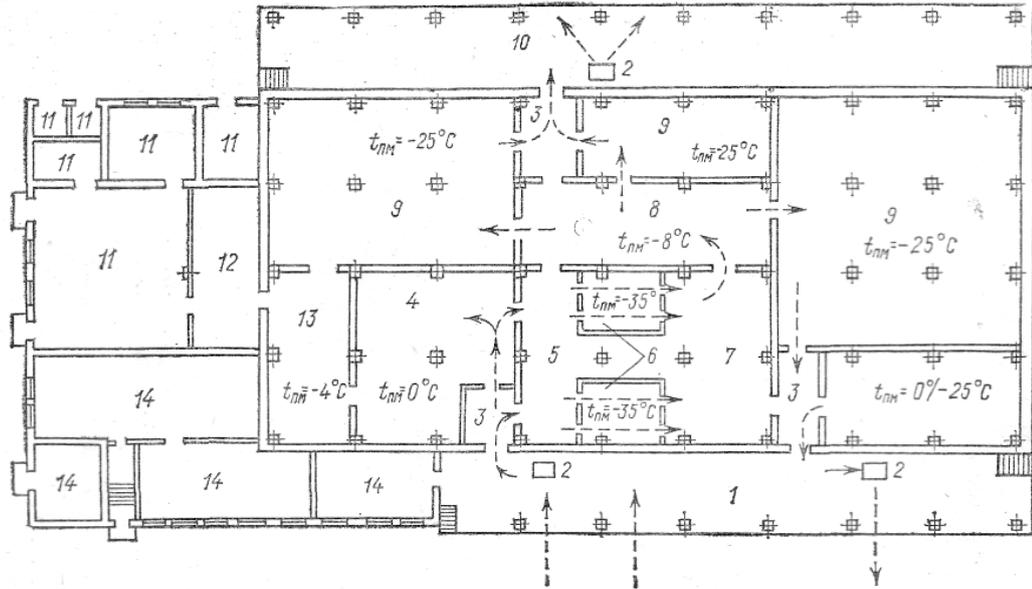
Общую массу перемещаемых грузов увеличивают на 7—10%, если грузы упакованы в какую-либо тару, и еще на 7—10% в случае перемещения их вместе с поддонами. Соответственно этому возрастает и число механизмов.

## § 2.4.

### **ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ПЛАНИРОВКЕ ХОЛОДИЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ, И ПУТИ ВЫПОЛНЕНИЯ ЭТИХ ТРЕБОВАНИЙ**

Планировка проектируемого предприятия является одним из узловых моментов проекта, поскольку при ее выполнении решается ряд комплексных вопросов в различных его разделах: архитектурном, строительном, технологическом, холодильном, энергетическом, механизации грузовых работ и др. Необходимость учета большого числа различных факторов при выполнении планировки затрудняет однозначное решение задачи. В связи с этим можно указать лишь на некоторые общие тенденции и установить некоторые общие требования, выполнение которых дает возможность найти более рациональные решения планировок.

1. Планировка должна соответствовать принятой в проекте схема технологического процесса, способствовать выполнению "технологических условий обработки продуктов (изделий).



**Рис. 2.5 Планировка одноэтажного производственного рыбного холодильника**

На рис. 2.5 показана планировка небольшого одноэтажного производственного рыбного холодильника, помещения которого расположены в соответствии со схемой технологического процесса, приведенной на рис. 2.1. Направление основного потока продуктов на рис. 2.5 указано стрелками. Приемку, сортировку и мойку рыбы производят на приемной платформе 1 (или на причале), куда выгружается рыба. На весах 2 находящаяся в вагонетках рыба взвешивается и направляется через тамбур 3 в аккумуляторное помещение 4, которое необходимо для того, чтобы создать некоторый запас рыбы и тем самым сгладить разницу между обычно неравномерным ее поступлением в холодильник и сравнительно равномерной производительностью замораживающих устройств. Из аккумуляторного помещения, а при равномерном поступлении и непосредственно с платформы 1 (причала) рыбу направляют в загрузочное помещение 5, где загружают на вагонетки, этажерки, в формы и другие приспособления, являющиеся принадлежностью замораживающих устройств. В замораживающие устройства 6 рыбу направляют четырьмя параллельными потоками. Замороженную рыбу выгружают в разгрузочной 7 и направляют в упаковочную 8, откуда в упакованном виде ее перемещают в камеры хранения мороженой рыбы 9. Выпуск рыбы осуществляют через тамбур 3 на железнодорожную платформу 10 или в сторону причала для отправки водным транспортом. Взвешивание рыбы в обоих случаях осуществляется весами 2. К одной из торцовых стен холодильника примыкают помещения машинного отделения 11, льдогенераторное помещение 12, а также бытовые и служебные помещения 14. В изолированном контуре находится ледохранилище 13, откуда снабжается льдом аккумуляторное помещение 4, в котором хранится рыба, пересыпанная льдом.

В качестве другого примера можно указать на планировку многоэтажных холодильников при крупных мясокомбинатах. Технологический процесс таких предприятий обычно осуществляется сверху вниз. Скот сам подымается по наклонному пути на самый верхний (например, пятый) этаж, где происходит его убой и разделка. На этом же этаже находятся помещения для охлаждения мяса и хранения охлажденного мяса. Помещение или устройства для замораживания находятся во втором сверху этаже, а в последующих этажах размещаются камеры хранения мороженого мяса. В нижнем (первом) этаже оборудуются экспедиция и помещения для хранения охлажденного мяса.

На рис. 2.6 приведена планировка одноэтажного холодильника крупного мясокомбината. Здесь принята сетка колонн 6x18 м. Из мясожирового корпуса по соединительному мостику I мясные туши поступают в холодильник и цепными конвейерами по подвесным путям направляются или в камеры охлаждения II, или в камеры однофазного замораживания III. По конвейеру 8 мясо

транспортируется в камеру хранения охлажденного мяса или в камеру хранения замороженного мяса VI. Предусмотрено, кроме того, замораживание мяса в блоках в помещении VIII. Мясо для торговой сети выдается через экспедицию IX на автомобильную платформу, а мясо, идущее на производство мясных продуктов, по конвейеру 16 направляется в мясоперерабатывающий корпус, примыкающий к холодильнику.

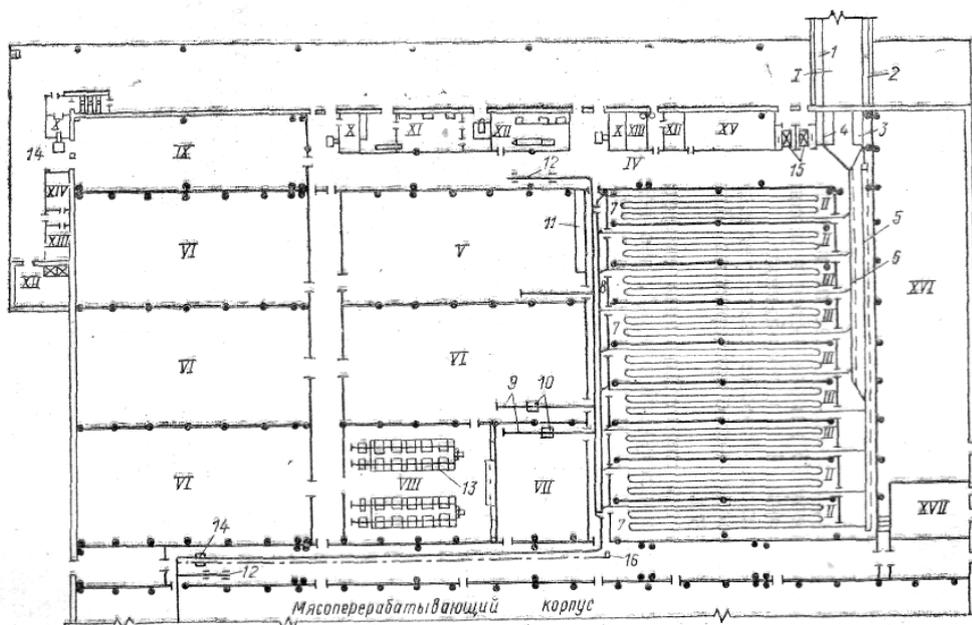
2. Планировка должна способствовать уменьшению первоначальных затрат на строительство предприятий. Для этого используются различные пути.

Первым из них может быть внедрение стандартных размеров строительных конструкций зданий, что позволяет применять типовые и стандартные конструкции, а в ряде случаев осуществлять строительство зданий из сборных элементов заводского изготовления. Так, при строительстве многоэтажных производственных зданий применяется стандартный шаг колонн 6х6 м, стандартная высота этажей (от пола одного этажа до пола другого), кратная 0,6 м. Высота одноэтажных зданий также делается: кратной 0,6 м. Шаг колонн в одноэтажных холодильниках обычно 6 м, а длина пролета выполняется кратной 6 м, например 12, 18 и 24 м.

Ко второму пути можно отнести сокращение площади вспомогательных помещений, что позволяет повысить коэффициент использования площади холодильника; особое значение имеет рациональное использование дорогого изолированного контура холодильника. На холодильниках старой постройки обычно предусматривалось большое количество сравнительно небольших охлаждаемых помещений. Необходимость обеспечить доступ в каждое из помещений обуславливала разветвленную коридорную систему. На современных холодильниках увеличивают размеры помещений и уменьшают число помещений для хранения грузов, что часто устраняет необходимость в коридорах, и они заменяются вестибюлями, достаточными для совершения транспортных операций. Естественно, что в последнем случае площадь холодильника используется значительно лучше.

Коридорную систему применяют при большой площади предприятия и большом количестве отдельных помещений. Чаще всего коридоры встречаются в одноэтажных холодильниках.

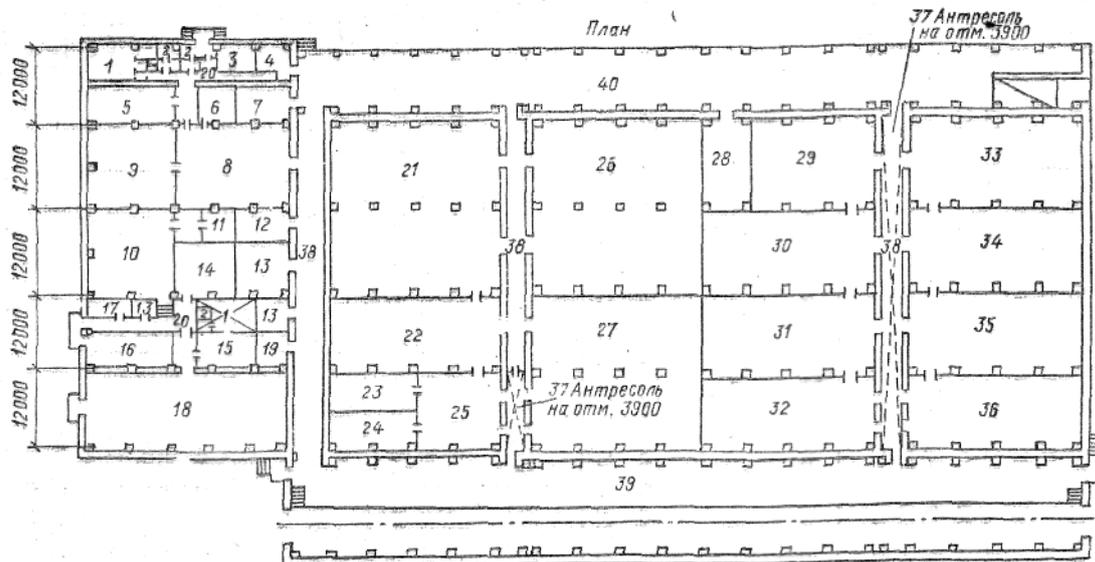
На рис. 2.7 дана планировка одноэтажного распределительного холодильника, в котором все транспортные связи осуществляются по коридорам 38, идущим перпендикулярно продольной оси здания и соединяющим железнодорожную 39 и автомобильную 40 платформы.



**Рис. 2.6. Планировка одноэтажного холодильника крупного мясокомбината**

I - мостик из мясожирового корпуса; II — камеры охлаждения мяса; III — камеры охлаждения или замораживания мяса; IV — экспедиция; V — камера хранения охлажденного или мороженого

мяса; VI — камеры хранения мороженого мяса; VII — разгрузочная; VIII — производство и замораживание мяса в блоках; IX — камера экспедиции; X — весовая; XI — зарядка погрузчиков; XII — санитарная обработка троллеев; XIII—XV — служебные помещения; XVI — машинное отделение; XVII — трансформаторная подстанция;  
 1-8 и 16 — конвейеры, 9 — наклонный участок пути для спуска туш; 10 и 14 — весы; 11 — стеллаж; 12 — элеватор для подъема полутуш на подвесной путь; 14— оборудование для расфасовки и замораживания мяса в блоках; 15 — лифт

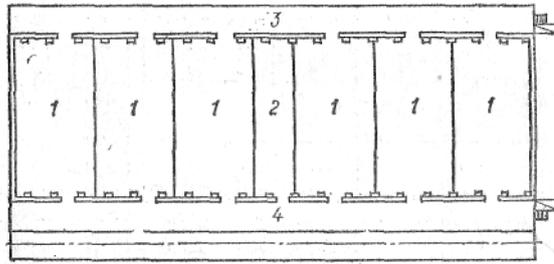


**Рис. 2.7. Планировка одноэтажного холодильника емкостью 6000 т с коридорами для транспортных связей.**

1—4 — бытовые помещения охлаждаемого склада; 5 — столярная мастерская; 6—11—помещения для ремонта и зарядки погрузчиков; 12 — помещения парафинирования сыров; 13 — кладовая; 14 — тепловой пункт; 15, 16 — помещения КИП; 17 — комната механика; 18 — машинное отделение; 19 — вентиляционная камера; 20 — коридор пристройки, 21-36 - холодильные камеры; 37 — антресоли охлаждаемого склада; 38 — коридоры; 39 — железнодорожная платформа; 40 — автомобильная платформа.

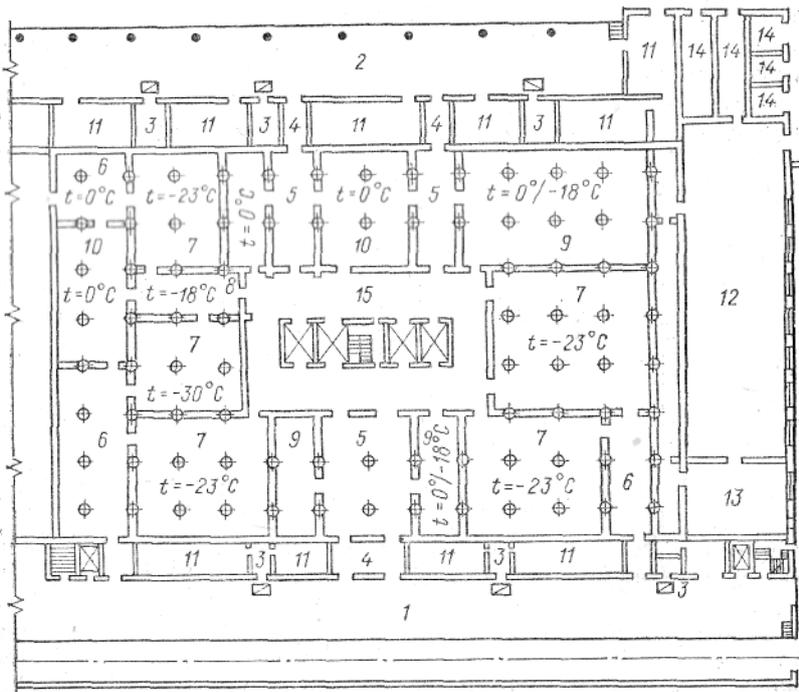
Другим целесообразным типом планировок одноэтажных холодильников является планировка без коридоров, с выходом из производственных помещений 1 и 2 непосредственно на обе платформы 3 и 4 так, как это показано на рис. 2.8. В таких случаях платформы нередко выполняются не только закрытыми, но и охлаждаемыми, с поддержанием в них температуры до  $(-10)$ — $(-12)$  °С. Современная тенденция к укрупнению площади отдельных помещений (и к уменьшению числа их), естественно, приводит к упрощению планировок. В США, например, построен одноэтажный распределительный холодильник емкостью 15000 т, состоящий всего из одной камеры хранения продуктов.

Важным при выполнении планировок является вопрос о месте размещения лифтов и лестничных клеток в многоэтажном холодильнике.



**Рис. 2.8. Бескоридорная планировка одноэтажного холодильника**

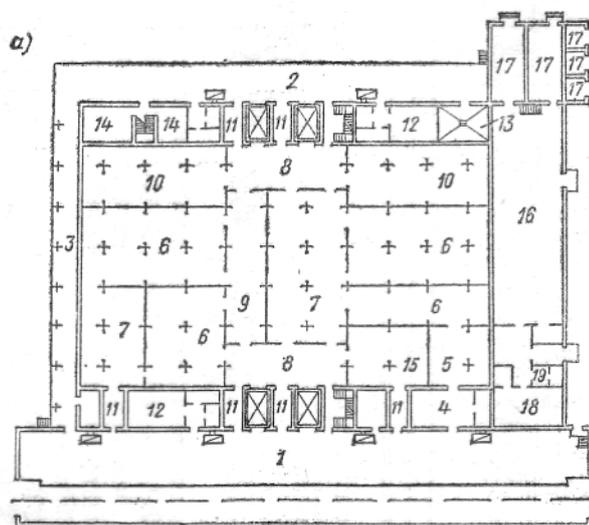
Возможны два вида распределения лифтов: внутреннее и внешнее. На рис. 2.9 показан первый этаж первой очереди Московского холодильника № 12 с внутренним (центральным) расположением лифтов. При этом сокращаются пути пробега транспортных механизмов и создается более высокая маневренность лифтов, поскольку они одинаково успешно могут обслуживать обе платформы. Однако в небольших зданиях значительно возрастает относительная роль площади, занятой вспомогательными помещениями в контуре холодильника, что сильно понижает коэффициент использования площади. В связи с этим внутреннее расположение лифтов может оказаться оправданным только для очень крупных холодильников. Желание улучшить использование площади при внутреннем расположении лифтов иногда приводило к отказу от вестибюлей на этих холодильниках, как это было сделано, например, в старом корпусе холодильника Ленинградского хладокомбината № 6, где установлены лифты, имеющие в верхних этажах двусторонние выходы непосредственно в низкотемпературные камеры хранения, а в первом этаже в экспедицию. Вследствие этого при открытых дверях возникает значительная циркуляция воздуха: теплый наружный воздух проходит через экспедицию, поднимается в лифтовые шахты и лестничные клетки и здесь соприкасается с холодными их поверхностями, граничащими с низкотемпературными помещениями холодильника, в результате чего происходит конденсация влаги из воздуха на поверхностях ограждений; опускающийся из камер по лифтовым шахтам холодный воздух усиливает охлаждение поверхностей. Из-за выпадения влаги происходит обмерзание поверхностей лифтовых шахт и лестничных клеток.

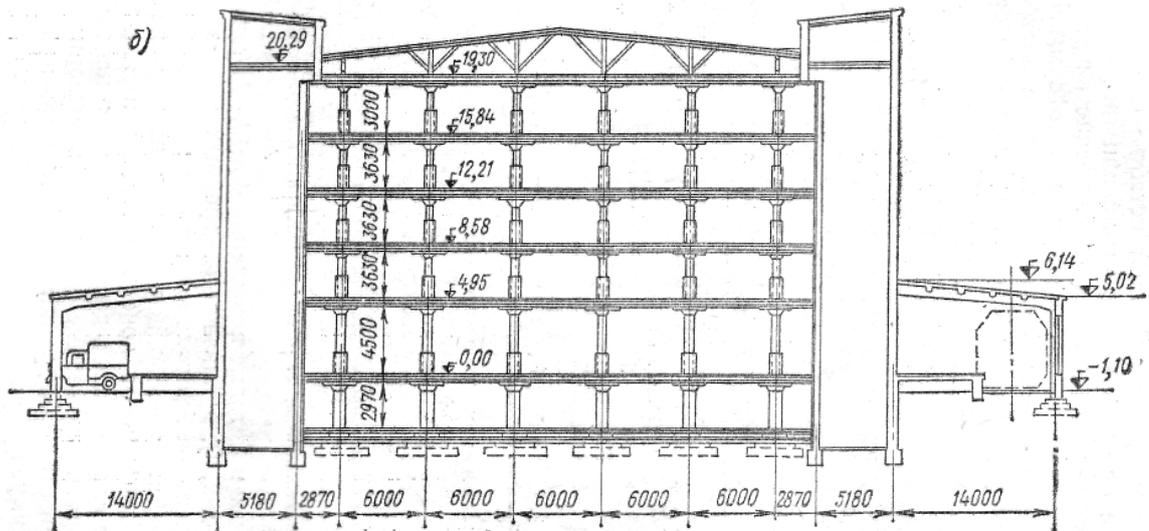


**Рис. 2.9. Планировка первого этажа Московского холодильника № 12:**

1 — железнодорожная платформа; 2 — автомобильная платформа; 3 — весовая; 4 — тамбур; 5 — вестибюль-экспедиция; 6 — накопитель; 7 — камера замораживания; 8 — разгрузочная; 9 — универсальная камера; 10 — камера хранения охлажденных продуктов; 11 — служебные и бытовые помещения технологического цеха; 12 — компрессорный зал; 13 — служебные и бытовые помещения машинного отделения; 14 — электротехнические помещения машинного отделения; 15 — вестибюль.

Чтобы не вызвать такого рода явления, в планировке, показанной на рис. 2.9, во всех этажах предусмотрены вестибюли 15, окружающие лифтовые шахты, а экспедиции 5 на первом этаже отделены от платформ тамбурами 4, представляющими собой температурные и влажностные шлюзы. Надежной защитой от проникновения теплого воздуха через двери является устройство у дверей воздушной завесы, которая совершенно не препятствует движению транспорта и проходу людей. При внешнем расположении лифтовых шахт и лестничных клеток такие трудноустраимые





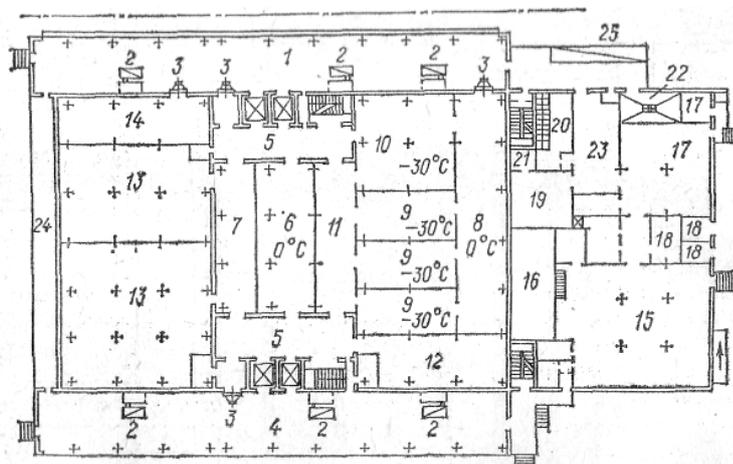
**Рис. 2.10. Распределительный многоэтажный холодильник емкостью 6200т:**

**а — план первого этажа; б — поперечный разрез:**

1 — железнодорожная платформа; 2 — автомобильная платформа; 3 — соединительная платформа; 4 — прием рыбы; 5 — камера охлажденной рыбы; 6 — морозилка; 7 — камера охлажденного мяса; 8 — вестибюль; 9 — экспедиция; 10 — универсальная камера; 11 — тамбур; 12 — грелка для рабочих; 13 — мойка инвентаря; 14 — контора склада; 15 — камера хранения дефектных продуктов; 16 — машинное отделение; 17 — электротехнические помещения машинного отделения; 18 — мастерская; 19 — бытовые помещения машинного отделения

явления не возникают. Однако при этом лифты обслуживают главным образом ту платформу, на которую они выходят (рис. 2.10, а). Достоинством внешнего расположения лифтов оказывается и то, что лестничные клетки получают естественное освещение.

Наружные лифты прежде располагали так, что их шахты выступали за контур здания, как это показано на рис. 2.10, а. При таком их расположении часть ширины платформы не могла быть достаточно полезно использована и тогда ее застраивали одноэтажными или двухэтажными пристройками, в которых размещались



**Рис. 2.11. План первого этажа распределительного многоэтажного холодильника емкостью 10000 т:**

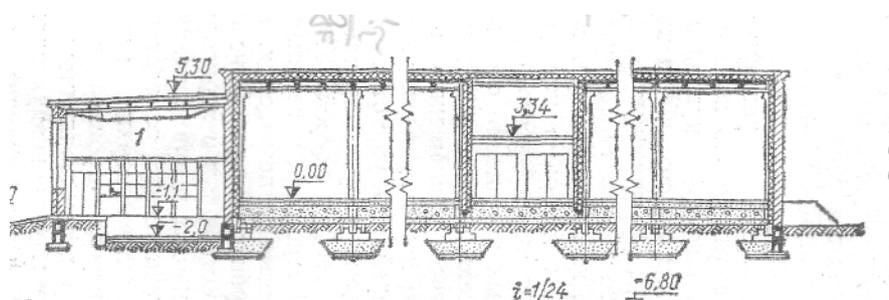
1 — железнодорожная платформа; 2 — весы; 3 — воздушная завеса; 4 — автомобильная платформа; 5 — вестибюль; 6 — экспедиция; 7 — коридор; 8 — накопитель; 9 — морозилка; 10 — камера домораживания; 11 — разгрузочная; 12 — камера хранения охлажденных продуктов; 13 — универсальная камера; 14 — камера краткосрочного хранения продуктов (дефектных); 15 — компресс сорный зал; 16 — аппаратная; 17 — мастерская; 18 — электротехнические помещения машинного отделения; 19 — генераторная; 20 — зарядная станция; 21 — щелочное отделение; 22 — моечная; 23 — помещение для осмотра и ремонта механизмов; 24 — соединительная платформа; 25 — пандус

служебные и бытовые помещения 4 и 12—14 технологического цеха. На рис. 2.10, б показан поперечный разрез холодильника этого типа. Позднее Гипрохолод стал размещать наружные лифты в контуре здания подобно показанному на рис. 2.11. При таком решении избавились от довольно тесных и темных пристроек (обстроек) на платформах и достигли лучшего использования площади платформы. Служебные и бытовые помещения в этом случае были вынесены в пристройки (одноэтажные или двухэтажные) к холодильнику.

Несомненно, все помещения, для которых не требуется поддержание в них низких температур, целесообразно выносить из контура холодильника в пристройки, имеющие сравнительно легкие строительные конструкции в связи с небольшими удельными нагрузками на пол и с возможностью выполнять такие пристройки одноэтажными или двухэтажными. Как правило, в пристройке к холодильнику располагается и машинное отделение так, как это показано в плане, например, на рис. 2.7, 2.9, 2.10, а, 2.11. Здание машинного отделения 1, также пристроенное к одноэтажному холодильнику, показано на рис. 2.12, а, на котором дан продольный разрез холодильника. Поперечный разрез этого же холодильника приведен на рис. 2.12, б.

Третьим путем является применение прогрессивных технологических процессов и интенсивного технологического оборудования, что позволит сократить время технологических операций, существенно сократить необходимую площадь основных производственных помещений, как это следует из выражения (2.8а).

3. Планировка должна обеспечить дешевую и удобную эксплуатацию предприятия. Основными источниками уменьшения эксплуатационных затрат являются: уменьшение теплопритоков охлаждаемые помещения; сокращение объема, организация и облегчение проведения погрузочно-разгрузочных работ.



**Рис. 2.12** Разрезы крупного одноэтажного холодильника: а — продольный, б - поперечный

Уменьшение теплопритоков может быть достигнуто, прежде всего, сокращением теплопередающей поверхности здания. Так как из всех геометрических тел прямоугольной формы наименьшую наружную поверхность, при сохранении того же самого объема, имеет куб, то совершенно естественна прежде существовавшая тенденция к строительству многоэтажных холодильников, по форме приближающихся к кубу. Однако при такой форме здания грузовой фронт холодильника нередко оказывался недостаточным, что заставляло несколько вытягивать здание в плане, отступая от отношения сторон 1:1. Для холодильника с развитым грузооборотом и для одноэтажных холодильников это отношение сторон обычно от 2 : 1 до 5 : 1 (для портовых). В настоящее время наибольшее значение имеет удешевление грузовых работ и уменьшение затрат ручного труда. Это и обуславливает тенденцию к постройке главным образом одноэтажных холодильников, на которых представляются значительно большие возможности для широкого

применения средств механизации грузовых работ, несмотря на увеличение (до 30—40%) теплопритоков в связи с относительным ростом наружной поверхности холодильника. Для одноэтажных холодильников характерно развитие грузового фронта, приводящее к вытягиванию холодильника в плане.

Для уменьшения теплопритоков целесообразно объединение всех охлаждаемых помещений на предприятии в единый «холодный» блок. Если охлаждаемые помещения разбросаны по всему предприятию, то это не только увеличивает теплоприток через их ограждения, но и способствует значительному росту тепловых и энергетических потерь в коммуникационных трубопроводах. Также целесообразно в многоэтажных холодильниках объединение охлаждаемых помещений с одинаковой температурой в температурные отсеки (лучше в вертикальные). Большое внимание должно уделяться уменьшению теплопритоков, проникающих вместе с теплым наружным воздухом через дверные проемы при открывании дверей. Как уже отмечалось выше, средствами борьбы с этими притоками могут быть тамбуры (шлюзовые помещения) и воздушные завесы у дверей. Уменьшение влажности воздуха в коридорах и вестибюлях имеет значение и для исправной работы дверей в охлаждаемые помещения. При высокой влажности воздуха может происходить конденсация влаги на поверхностях ограждений в вестибюлях и коридорах, в том числе и на дверях, что нередко приводит к примерзанию их в закрытом положении. Теперь на холодильниках находят применение двери с электрическим обогревом поверхности дверного проема. В коридорах и вестибюлях нередко производят осушение воздуха путем охлаждения его в воздухоохладителях, на поверхности которых осаждается влага. Эти воздухоохладители устанавливаются под потолком указанных помещений.

Для удешевления и облегчения грузовых работ первостепенное значение имеет возможность применения различных механизмов. Для этого необходимы большие пролеты между колоннами, достаточная ширина проездов, коридоров, величина которых должна быть 4 - 6 м, чтобы обеспечить разъезд встречных механизмов, нагруженных, например, мясными полутушами; желательная ширина платформ 8 - 10 м. Для создания направленного поточного движения грузов необходимо избегать встречных потоков и уменьшать число мест их пересечения. Например, наличие двух выходов на каждую из платформ (рис. 2.9 и 2.10, а) позволяет создать в этом месте направленное движение грузовых потоков. Во всех планировках предусмотрено направленное движение грузов через помещения для замораживания без встречных потоков.

Удешевление грузовых работ связано со способом расположения платформ, их размерами и конфигурацией. По существующим нормам расстояние от оси железнодорожного пути до края платформы должно быть не меньше 1,92 м; высота платформы над головкой рельса должна быть 1,35—1,40 м, чтобы она находилась на уровне пола новых железнодорожных вагонов. Чтобы обеспечить открывание дверей вагонов старых типов, вдоль железнодорожного пути платформа должна иметь пониженную часть шириной 560 мм, находящуюся на высоте 1,1 м от головки рельса.

Автомобильная платформа во всех случаях должна быть приподнята на 1,2 м над уровнем земли. При необходимости может быть выполнена подсыпка грунта у автомобильной платформы. Теперь получили распространение закрытые железнодорожные и автомобильные платформы с длинными навесами или козырьками, закрывающими вагоны и кузова автомашин от солнечных лучей и атмосферных осадков.

Для въезда на платформы механизмов и ручных тележек устраиваются пандусы (наклонные спуски), а для движения людей - лестницы (рис. 2.11). Для взвешивания грузов предусматриваются одно-, двухтонные весы примерно на каждые 20 м фронта платформы.

Применение тех или иных средств механизации грузовых работ или средств транспортировки грузов также должно учитываться при выполнении планировки. Так, на портовых или рыбных производственных многоэтажных холодильниках разгрузка и погрузка судов нередко производится при помощи порталных кранов. В таких случаях может оказаться целесообразным направлять грузы непосредственно на верхние этажи, минуя первый. В связи с этим на этажах устраиваются балконы (консольные площадки) для приема грузов, подаваемых краном. Через балконы груз попадает в вестибюль данного этажа. Балконы не могут быть выполнены друг под другом, а должны быть смещены, чтобы верхний балкон не препятствовал опусканию груза на нижележащий (рис. 2.13). На некоторых холодильниках находят применение наклонные спуски, а

также машины непрерывного транспорта (конвейеры, рольганги, транспортеры и др.), наличие которых влияет на планировку этих предприятий.

В связи с широким применением механизмов (штабелелекладчиков, электрокар и т. п.) на современных холодильных предприятиях предусматриваются специальные помещения для их обслуживания. На рис. 2.11 показаны такие помещения, расположенные в пристройке к зданию холодильника: генераторная 19, где находятся источники постоянного тока, помещение 20 для зарядки аккумулятора (зарядная станция), щелочное помещение 21 для приготовления электролита для аккумуляторов, моечная 22 и помещение 23 для осмотра и ремонта механизмов. Эти помещения объединены в блок и имеют выход на платформу.

4. Планировка должна учитывать особенности принятой системы охлаждения.

В некоторых частных случаях выбранная система охлаждения оказывает влияние на расположение охлаждаемых помещений, заставляет предусматривать достаточную площадь для размещения в них холодильного оборудования. Например, при воздушном охлаждении помещений некоторую часть площади занимают воздухоохладители. На рис. 2.14 показан план этажа с камерами 2, охлаждаемыми при помощи воздухоохладителей, для размещения которых предусмотрены помещения 3, где располагаются также вентиляторы и их электродвигатели. Для удобного и независимого от работы склада обслуживания воздухоохладителей, вентиляторов и электродвигателей доступ в помещения 3 осуществляется непосредственно из вестибюля 1. На одноэтажных холодильниках возможно расположение воздухоохладителей, при котором не занимает полезная площадь. Так, на рис. 2.15 воздухоохладители 5 и вентиляторы 4 размещены в помещениях 3 (так называемых технических коридорах) над коридорами 1, которые могут иметь меньшую высоту, чем охлаждаемые помещения 2. Под балками 7 проходит воздуховод 8 с соплами 6.

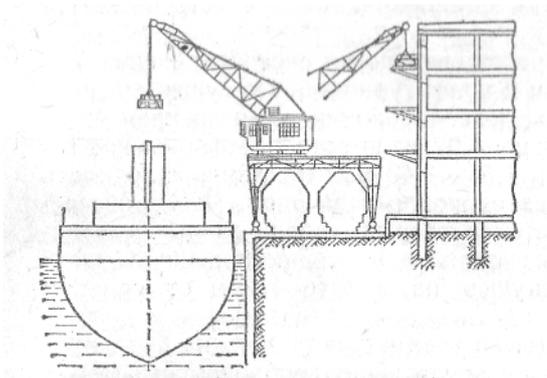


Рис. 2.13. Схема механизации перемещения грузов с судна на балкон портового холодильника

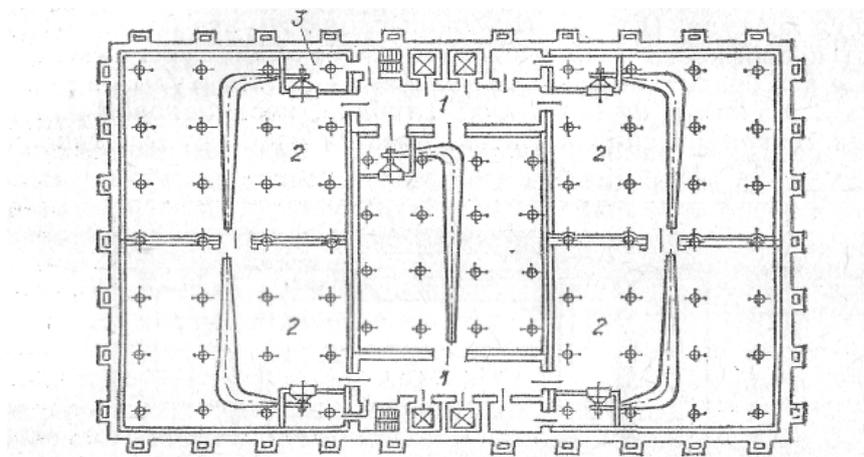
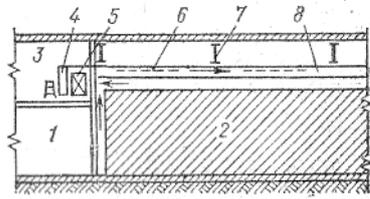


Рис. 2.14. Планировка этажа здания с воздушным охлаждением



**Рис. 2.15. Разрез одноэтажного холодильника с воздушным охлаждением**

5. Планировка должна отвечать требованиям правил техники безопасности и пожарной безопасности.

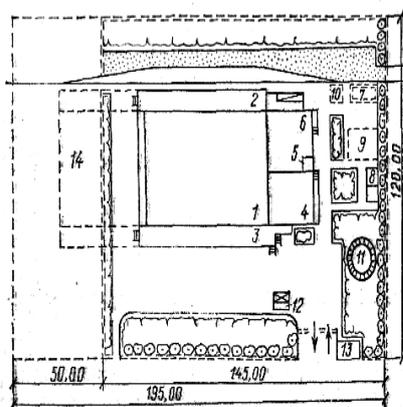
6. Планировка должна обеспечить возможность расширения предприятия (если таковое обусловлено заданием на проектирование).

При постройке предприятия в несколько очередей его расширение возможно или путем надстройки многоэтажного здания, или путем пристройки к зданию первой очереди дополнительных корпусов. В холодильном строительстве первый путь может быть использован очень редко, так как при этом мощные строительные конструкции (фундаменты, колонны и др.) будут мало нагружены. До начала расширения; лифты должны быть построены или с учетом будущего расширения, или удлиняться при надстройке этажей. Более целесообразным является второй путь, но при разработке планировки должна быть намечена сторона, в которую пойдет будущее расширение с тем, чтобы к этой стороне не примыкали помещения или пристройки, которые могут помешать расширению. Так, например, угловое расположение платформы может усложнить расширение здания. На рис. 2.16 изображен генеральный план холодильника емкостью 10 000 тонн, на котором предусмотрена площадка 14 для расширения предприятия.

Следует остановиться на одном явлении, имеющем существенное значение для планировки холодильного предприятия. Во многих случаях и направление технологического процесса, и необходимость уменьшения путей пробега или подъема грузов определяют размещение низкотемпературных помещений на этаже, пол которого лежит непосредственно на грунте. Большое значение имеют последствия такого расположения помещений и для строительства одноэтажных холодильников. Особенностью холодильных сооружений при расположении низкотемпературных помещений непосредственно на грунте является то, что в этом случае как бы имитируется вечная зима для площади, на которой расположены эти помещения.

На открытом месте (т. е. не занятом строениями) температура поверхностного слоя грунта изменяется в зависимости от времени года, почти в точности следуя за колебаниями температуры наружного воздуха. В более глубоких слоях грунта по мере удаления от поверхности сезонные колебания температуры затухают и по фазе все больше отстают от колебаний температуры наружного воздуха. Наконец, на некоторой глубине, неодинаковой для различных географических пунктов, имеется слой грунта, так называемый пояс постоянной температуры, где сезонные колебания температуры уже не замечаются. Температура в этом поясе примерно равна среднегодовой температуре в данной местности.

**Рис. 2.16. Схема генерального плана распределительного холодильника емкостью 10000 т:**



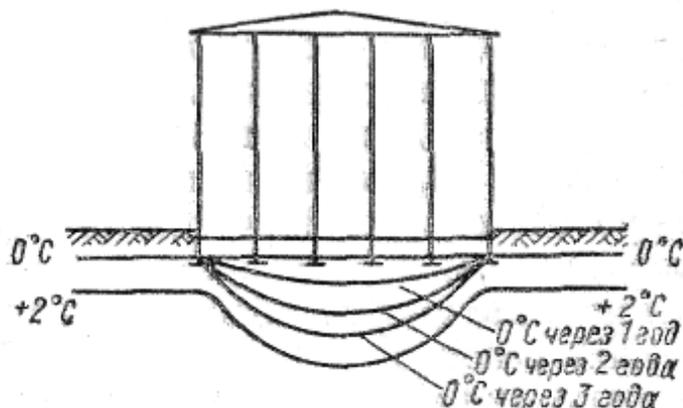
1 — холодильник (первая очередь); 2 — железнодорожная платформа; 3 — автомобильная платформа; 4 — машинное отделение (в двухэтажной части здания — административные и

бытовые помещения); 5 — трансформаторная подстанция; 6 — мастерская, обслуживание погрузчиков, котельная и др.; 7 — площадка для угля; 8 — склад аммиака и масел; 9 — площадка для мойки автомашин; 10 — площадка для шлака; 11 — резервуар для воды; 12 — автомобильные весы; 13 — проходная; 14 — площадка для расширения охлаждаемого склада

Ниже слоя постоянной температуры начинается постепенное, равномерное повышение температуры вследствие геотермического эффекта. Возрастание температуры по мере углубления в грунт характеризуется величиной геотермической постоянной, которая в среднем равна одному градусу повышения температуры на каждые 33 м глубины. Такому повышению температуры соответствует весьма небольшая плотность теплового потока из недр земли — всего  $0,077 \text{ Вт/м}^2$ .

Таким образом, выше пояса постоянной температуры наблюдаются сезонные колебания температуры, и в местностях с положительной среднегодовой температурой можно установить глубину, на которую опускается в грунт нулевая изотерма. Эта величина называется глубиной промерзания грунта и зависит от климатических особенностей данной местности. В южных районах страны глубина промерзания грунта обычно не превышает 1 м (в Алма-Ате 1 м), в районах средней полосы 1,0—1,4 м (в Ленинграде 1,2 м, в Москве 1,4 м), в северных районах страны 1,6—2,5 м; наконец, есть районы вечной мерзлоты, где грунт практически не оттаивает и в летнее время.

Массивные обычные промышленные здания строятся таким образом, чтобы подошва фундамента лежала ниже глубины промерзания грунта (при умеренной ее величине), если грунт в пункте строительства является влажным (мокрый песок, пльвун, суглинистые и глинистые грунты и т. п.). Необходимость этого вызвана тем, что при замерзании слоев грунта, содержащих воду, происходит выпучивание грунта, вызываемое увеличением объема воды при ее отвердевании. При расширении воды в грунте возникают усилия, примерно на порядок превосходящие величину удельной нагрузки от здания, передаваемой на грунт через подошву фундамента. Поэтому, если грунт под фундаментом начнет промерзать, то усилий, какие при этом возникнут, достаточно для того, чтобы «поднять» любое здание. Образование льда начинается в щелях и раковинах в грунте, где вода находится под относительно меньшим давлением и, следовательно, имеет более высокую температуру замерзания. Так как давление насыщенного пара над поверхностью льда ниже, чем над водой, то это способствует притоку водяного пара и его конденсации на поверхности льда. В связи с неравномерностью образования льда в грунте подъем здания происходит или в отдельных местах, или весьма неравномерно, вследствие чего он сопровождается появлением трещин в фундаментах, стенах, перекрытиях, нарушающих прочность здания.



**Рис. 2.17. Постепенное понижение нулевой изотермы под полом холодильника**

В холодильных сооружениях это явление усложняется. Во-первых, из-за наличия низкотемпературных помещений, расположенных на грунте, последний может промерзнуть не только под фундаментом по периметру здания, как это случается в обычных отапливаемых зданиях, но и под зданием. Во-вторых, если под фундаментом обычных зданий грунт в теплое время года оттаивает, то под холодильными сооружениями все время царит «вечная зима», вследствие чего нулевая изотерма постепенно опускается все ниже и ниже, свидетельствуя о

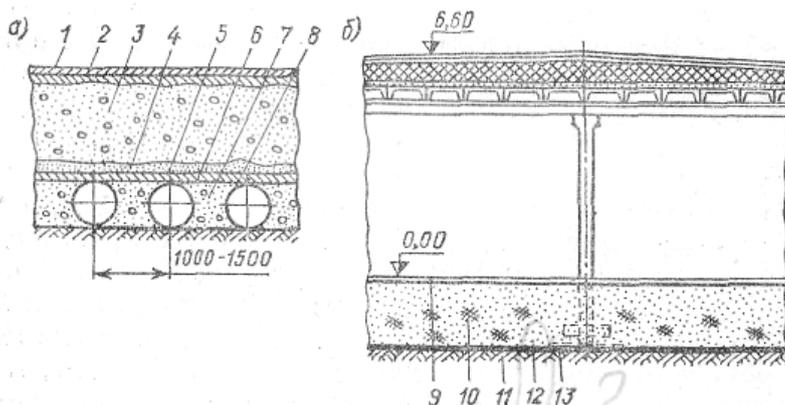
промерзании более глубоких слоев грунта (рис. 2.17). Опытные данные говорят о том, что в первые годы эксплуатации после постройки нулевая изотерма под холодильником за год опускается примерно на 1 м. Продвижение нулевой изотермы со временем замедляется и прекращается при достижении равновесного состояния, характеризуемого равенством между количеством теплоты, отводимым от грунта на изотермической поверхности, и теплопритоком к ней от нижележащих слоев грунта. Промерзание влажного грунта под Низкотемпературными помещениями на некоторых отечественных и зарубежных холодильниках привело к выпучиванию полов в нижних этажах, появлению трещин в стенах, колоннах, междуэтажных перекрытиях. Несомненно, что это явление следует учитывать при выполнении планировок и предупреждать его вредные последствия. Надо иметь в виду, что из-за очень малой величины теплового потока, идущего от нижних слоев грунта, практически невозможно защититься от промерзания грунта устройством даже мощного слоя тепловой изоляции. В связи с этим приходится применять иные меры. Не следует, и переоценивать это явление. Прежде всего говорить о возможном пучении грунта можно только в случае наличия влаги в грунте и при высоком уровне грунтовых вод. Последствия промерзания более сильно проявляются в мелкодисперсных грунтах (мелком песке, иле, тонкой глине). Не могут вспучиваться сухие грунты (скала, сухая галька, сухой песок и др.). Естественно также, что пучение грунта возможно лишь под помещениями с отрицательными температурами ниже  $(-2)$ — $(-3)$  °С.

Для многоэтажных холодильников целесообразным путем, избавляющим от опасных последствий пучений грунта, является отказ от расположения низкотемпературных помещений непосредственно на грунте; в этом случае низкотемпературные помещения можно или размещать в этажах выше первого, или устраивать подвалы. Чаще прибегают к устройству подвалов, в которых предусматривают помещения с температурами  $-2^{\circ}\text{C}$  и выше. Устройство подвалов под одноэтажными холодильниками, хотя изредка и встречается, не может рекомендоваться, так как тогда теряется одно из главных преимуществ — возможность больших удельных нагрузок на пол. Не могут быть легкими и строительные конструкции таких холодильников, ставших по существу многоэтажными.

Еще одним методом защиты грунта, приближающимся к предыдущему, является отрыв пола холодильника от земли. Такой холодильник строится на низких железобетонных столбиках, и под холодильником образуется проветриваемое подполье высотой 0,9—1,0 м, которое продувается наружным воздухом путем его естественной циркуляции. Этот способ характеризуется повышенными капитальными затратами и низкими эксплуатационными затратами.

Большое применение находят устройства, защищающие грунт от промерзания путем подогрева пола охлаждаемых помещений.

На ряде старых отечественных холодильников применены так называемые шанцевые полы, представляющие собой полы с системой вентилируемых каналов. Такие каналы или продухи образуются под полом продольными стенками, выложенными в полкирпича, или выполняются из бетонных, асбоцементных, керамических труб с внутренним диаметром 200—300 мм, уложенных с расстоянием между осями 1,0—1,5 м (рис. 2.18, а). В теплое время года в каналы подается наружный воздух, а в холодное время года (или при высокой влажности наружного воздуха) осуществляется рециркуляция воздуха в каналах, для чего воздух, нагнетаемый вентилятором в каналы, предварительно подогревается в воздухоподогревателе (калорифере).



**Рис. 2.18. Способы подогрева пола холодильника: а — шанцевый пол с каналами из труб; б — конструкция пола с электрическим подогревом:**

1 — асфальт 40 мм в два слоя; 2 — бетонное основание 120 мм; 3 — шлак 100—700 мм; 4 — шлаковый песок 30 мм; 5 — гидроизоляционный слой; 6 — бетон; 7 — глинобетон; 8 — асбоцементные или бетонные трубы; 9 — чистый пол; 10 — песчаный грунт; 11 — утрамбованный грунт; 12 — гидроизоляционный слой; 13 — бетонная подготовка с электронагревателями.

Шанцевые полы оказались дорогими и не всегда надежными, в частности, из-за конденсации в каналах водяного пара из воздуха.

В настоящее время преимущественное применение находит электрический подогрев пола, являющийся конструктивно наиболее простым. Электрические нагреватели выполняются из стальных прутков диаметром 8—12 мм, укладываемых с шагом 0,3—0,4 м в бетонную подушку на грунте толщиной до 100 мм (рис. 2.18, б). Концы прутков последовательно свариваются для того, чтобы создать непрерывную электрическую цепь. На образованные таким образом секции подается напряжение 24- или 36 В. При этом способе температуру в бетонном слое между прутками нагревателей удается автоматически поддерживать не ниже 1—2°С. Этот способ дешевле шанцевых полов по капитальным затратам, но требует расхода электрической энергии, что вызывает повышенные эксплуатационные затраты.

На некоторых холодильниках в бетонную подушку под теплоизоляционным слоем пола уложены змеевики из стальных труб диаметром 57 или 38 мм с шагом 700—900 мм, в которых циркулирует масло или какой-либо не замерзающий и не вызывающий коррозии труб водный раствор, например, этиленгликоля. Циркулирующая жидкость перед подачей в трубы подогревается до 15—20°С, причем подогрев жидкости может осуществляться или перегретым паром хладагента, выходящим из компрессора, или каким-либо источником низкопотенциальной теплоты, в связи с чем такая система может быть весьма экономичной.

При использовании теплоты перегретого пара хладагента для подогрева пола, на случай возможной работы компрессоров с перерывами или с малой нагрузкой, необходимо предусматривать дополнительные аппараты для нагревания жидкости, подаваемой в змеевики пола, другими источниками энергии, например электроэнергией или водяным паром.

Делаются попытки обогревать пол под холодильником при помощи устройств, аналогичных термосифону (тепловой трубе). В отдельном испарителе образуется аммиачный пар при подаче в испаритель, например, части воды, выходящей из конденсатора. Этот пар поступает в змеевик, находящийся в полу, и там конденсируется, так как температура здесь ниже температуры насыщения, соответствующей давлению пара в испарителе. Теплота конденсации обогревает пол. Образовавшаяся жидкость стекает самотеком в испаритель. Такая система весьма экономична, но требует тщательного выполнения и монтажа, чтобы обеспечить надежную плотность системы и обязательный наклон всех труб к испарителю.

## **Глава 3**

### **ИЗОЛЯЦИЯ ОХЛАЖДАЕМЫХ ПОМЕЩЕНИЙ**

#### **§ 3.1. НАЗНАЧЕНИЕ ИЗОЛЯЦИИ ОХЛАЖДАЕМЫХ ПОМЕЩЕНИЙ**

Устройство изолированных наружных и внутренних ограждений является важнейшей характерной особенностью строительных конструкций охлаждаемых помещений холодильных предприятий, отличающей их от аналогичных конструкций других промышленных предприятий. При строительстве холодильного предприятия на создание изоляции расходуется 25—40% стоимости всего сооружения, а на каждую тонну емкости холодильника до 0,6 м<sup>3</sup> теплоизоляционных материалов, в связи с чем должно быть уделено серьезное внимание правильному выбору изоляционного материала, тщательному проектированию и выполнению изоляционных конструкций ограждений. Отсутствие изоляции или ее значительное ухудшение влекут за собой невозможность поддержания в охлаждаемых помещениях нужных теплового и влажностного режимов, увеличение усушки продуктов, порчу хранящихся ценных грузов и увеличение расхода

энергии на производство холода. Все это указывает на необходимость внимательного подхода к широкому кругу вопросов, относящихся к изоляции, охлаждаемых помещений.

Поскольку в охлаждаемых помещениях поддерживается температура  $t_{пм}$ , более низкая, чем температура окружающей наружной среды  $t_n$ , то между окружающей средой и охлаждаемым помещением существует перепад температур  $t_n - t_{пм}$ , а в самом ограждении — температурное поле. Перепад температур является причиной, теплового потока через наружные ограждения внутрь охлаждаемого помещения. Плотность  $q$  этого теплового потока ( $Вт/м^2$ )

$$q = k_n * (t_n - t_{пм}) = (t_n - t_{пм}) / R_n \quad (3.1)$$

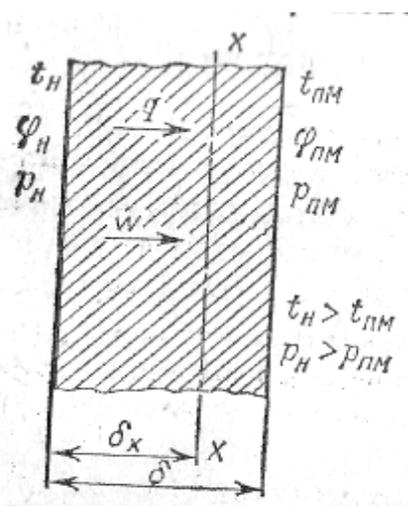
где  $R_n$  — термическое сопротивление наружного ограждения,  $м^2К/Вт$ .

Так как температура наружного воздуха обычно значительно выше температуры воздуха охлаждаемого помещения, то и содержание влаги в наружном воздухе оказывается больше, чем содержание влаги в воздухе охлаждаемого помещения. В результате возникает перепад влагосодержаний, или перепад парциальных давлений (упругости) водяного пара  $p_n - p_{пм}$  по обеим сторонам ограждения, и влажностное поле (поле упругости водяного пара) внутри ограждения. Наличие этого перепада давлений вызывает поток водяного пара, который диффундирует через ограждение (рис. 3.1) внутрь охлаждаемого помещения, и плотность  $w$  этого потока в  $кг/(м^2с)$

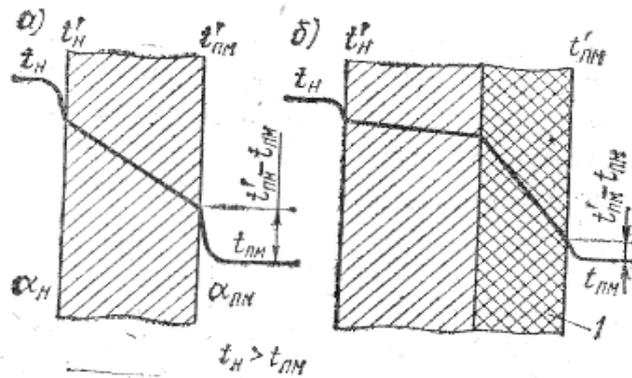
$$w = (p_n - p_{пм}) / H_n \quad (3.2)$$

где  $H_n$  — сопротивление ограждения паропрооницанию,  $м^2сПа/кг$ .

Полностью прекратить потоки теплоты и водяного пара при наличии  $\Delta t$  и  $\Delta p$  невозможно, так как это потребовало бы выполнения ограждений с бесконечно большими сопротивлениями теплопередаче и паропрооницанию.



**Рис. 3.1. Элемент однородного ограждения охлаждаемого помещения**



**Рис. 3.2. Уменьшение разности температур у поверхностей изолированного ограждения по сравнению с неизолированным**

Однако, увеличивая в рациональных пределах указанные сопротивления, можно существенно уменьшить проникновение теплоты и водяного пара. Эта задача и выполняется с помощью изоляции, которая представляет собой элемент ограждения помещений или производственного оборудования, обладающий значительным сопротивлением прохождению теплоты и влаги и вследствие этого существенно уменьшающий их проникновение через ограждения.

Проникающие в охлаждаемое помещение теплота и влага в тепловом отношении приводят к одному и тому же результату: увеличению тепловой нагрузки на холодильное оборудование, установленное в охлаждаемом объекте. Следовательно, изоляция, уменьшая теплопритоки и влагопритоки, способствует уменьшению расхода энергии на холодильную установку при поддержании заданного режима в охлаждаемом объекте.

Так как для испарения влаги с поверхности продуктов, находящихся в охлаждаемом помещении, необходимо подводить теплоту, то уменьшение теплопритока в помещение способствует сокращению усушки продуктов. Д. Г. Рютов (ВНИХИ) показал, что каждый килоджоуль количества теплоты, проникшей в помещение с температурой  $-18^{\circ}\text{C}$ , где хранятся неупакованные пищевые продукты, вызывает испарение (т. е. усушку) примерно  $0,036\text{ г}$  влаги с их поверхности (а при  $-10^{\circ}\text{C}$  — около  $0,062\text{ г}$  на  $1\text{ кДж}$ ). Таким образом, изоляция, уменьшая теплопритоки, способствует более длительному сохранению высокого качества продуктов, хранящихся в охлаждаемом помещении.

Значение тепловой изоляции еще и в том, что ее наличие позволяет приблизить температуру внутренней поверхности ограждения к температуре внутри помещения и тем самым значительно уменьшить разность температур  $t'_{nm}$  и  $t_{nm}$  (рис. 3.2). Плотность теплового потока, проходящего через ограждение, по условию стационарности равна не только  $(t_n - t_{nm})/R_n$ , но и

$$q = \alpha_{nm} \cdot (t'_{nm} - t_{nm}) = (t'_{nm} - t_{nm})/R_{nm} \quad (3.3)$$

где  $\alpha_{nm}$  — коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности ограждения к воздуху помещения;  $R_{nm}$  — термическое сопротивление теплоотдачи от этой поверхности.

Тогда

$$\begin{aligned} (t_n - t_{nm})/R_n &= (t'_{nm} - t_{nm})/R_{nm} \\ t'_{nm} - t_{nm} &= R_{nm} \cdot (t_n - t_{nm})/R_n \end{aligned} \quad (3.4)$$

Как видно из выражения (3.4), при заданных  $t_n$  и  $t_{nm}$  и при неизменном термическом сопротивлении теплоотдачи  $R_{nm}$  разность температур  $t'_{nm} - t_{nm}$  обратно пропорциональна общему термическому сопротивлению ограждений. Поэтому на рис. 3.2, б, где показано ограждение, изолированное слоем теплоизоляционного материала 1, разность температур у поверхностей ограждений значительно меньше, чем у поверхностей того же ограждения, но не изолированного (рис. 3.2, а). Большая разность температур между внутренней поверхностью и воздухом в помещении создает усиленную циркуляцию воздуха у ограждений и повышенную усушку грузов, хранящихся вблизи ограждений, а также может привести или к отеплению этих грузов в летнее время, или к подмораживанию в зимнее время при  $t_n < t_{nm}$ . Подмораживание грузов также может

быть при недостаточной изоляции внутренних ограждений, отделяющих низкотемпературные помещения от помещений, в которых хранятся охлажденные продукты при более высоких температурах. Большая разность температур на поверхностях ограждений может быть причиной конденсации влаги на поверхности с теплой стороны, поскольку возможно понижение температуры именно этой поверхности ниже температуры точки росы окружающего воздуха. В соответствии с задачами, стоящими перед холодильной изоляцией, можно считать, что изоляция представляет собой единство (сочетание) теплоизоляционного материала, пароизоляционного (гидроизоляционного) материала и изоляционной конструкции. В связи с этим необходимо ознакомиться с каждой из этих трех составляющих изоляции холодильных сооружений.

### § 3.2.

## СВОЙСТВА ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Изоляция ограждений холодильных сооружений оказывается в трудных условиях прежде всего из-за непрерывных изменений температуры и влажности наружного воздуха, переменного воздействия солнечной радиации и ветра. Потoki теплоты и влаги не только меняются по величине, но иногда (при относительно высоких температурах в помещениях) и по направлению. Особенностью работы холодильной изоляции является возможность конденсации водяного пара на поверхностях ограждения или внутри изоляции, а в некоторых случаях и замерзания выпавшей влаги. В этих условиях необходимо, чтобы теплоизоляционные материалы не только имели хорошие первоначальные свойства, но и по возможности сохраняли их в условиях длительной эксплуатации. По этой причине теплоизоляционные материалы должны обладать определенными свойствами, позволяющими изолированным ограждениям успешно выполнять свои функции в течение значительного срока.

1. Основное свойство, которым должен обладать теплоизоляционный материал, — это низкая способность проводить теплоту, характеризуемая соответственно малой величиной коэффициента теплопроводности  $\lambda$  Вт/(мК). В определенной степени указанное свойство предполагает малую объемную массу материала  $\rho_{об}$  (кг/м<sup>3</sup>). Связь между двумя этими величинами объясняется тем, что характерной особенностью структуры теплоизоляционных материалов является высокая пористость. Можно сказать, что каждый теплоизоляционный материал состоит из каркаса твердого вещества, образующего оболочку пор (ячеек, капилляров), и воздуха (или другого газа), заполняющего объем пор. В связи с такой неоднородностью структуры теплоизоляционных материалов характеристикой их массы является не плотность, а объемная масса, представляющая собой массу единицы объема системы.

Если обозначить через  $\rho$  плотность оболочки пор изоляционного материала и пренебречь массой газа в порах материала по сравнению с массой каркаса, то можно написать  $V_{мат} \cdot \rho_{об} = V_{кар} \cdot \rho$ . Тогда относительная доля  $M$  объема каркаса  $V_{кар}$  в общем объеме материала  $V_{мат}$  будет  $M = V_{кар} / V_{мат} = \rho_{об} / \rho$ , а пористость  $\Pi$  или относительный объем пор в материале может быть определен по выражению  $\Pi = 1 - M = 1 - (\rho_{об} / \rho)$  или  $\Pi = (\rho - \rho_{об}) / \rho$ . Основанием для сделанного допущения является то, что плотность структуры минералов составляет 2400—3000 кг/м<sup>3</sup>, органических материалов 1450—1650 кг/м<sup>3</sup>, а плотность газов при атмосферных условиях 1—2 кг/м<sup>3</sup>. Теплоизоляционных материалов колеблется от 50% у материалов с относительно высокой объемной массой до 99% у материалов с низкой объемной массой.

Благодаря пористой структуре изоляционных материалов их коэффициент теплопроводности определяется соотношением между количеством воздуха (или газа) внутри пор, обладающего весьма низким коэффициентом теплопроводности, и вещества в твердой оболочке. Так, сухой неподвижный воздух при 0° С имеет коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0,023$  Вт/(мК), у газообразной двуокиси углерода  $\lambda = 0,014$  Вт/(мК), у перегретого пара хлороформа-11  $\lambda = 0,008$  Вт/(мК), а хлороформа-12  $\lambda = 0,009$  Вт/(мК); коэффициент теплопроводности оболочек пор находится в интервале от 2,3—5,8 Вт/(мК) для естественных минералов и растительных волокон до 10,5—419 Вт/(мК) для металлов. Коэффициент теплопроводности материалов, применяемых для тепловой изоляции, в зависимости от вышеуказанного соотношения находится в пределах 0,015—0,35 Вт/(мК).

В применении к пористым теплоизоляционным материалам, термин коэффициент теплопроводности носит условный, т. е. эквивалентный характер, так как в них наблюдается не только чистая теплопроводность, как в однородных твердых телах. В действительности в пористых телах передача теплоты осуществляется всеми тремя способами: теплопроводностью, конвекцией и лучеиспусканием. Передача теплоты теплопроводностью происходит главным образом по материалам каркаса, в то время как в конвективном обмене участвует газ, заключенный внутри пор, а радиационный теплообмен осуществляется между поверхностями пор. Существенную роль в общем, процессе передачи теплоты в пористых телах играет конвективный теплообмен. Его относительное значение возрастает для пор большего размера. Как видно из табл. 3.1, при росте диаметра пор до 0,5 и даже до 1 мм не

### Условный коэффициент теплопроводности воздуха (Вт/(мК)) в зависимости от размера пор

Температура, °С	Диаметр пор, мм					
	0	0,1	0,5	1,0	2,0	3,0
0	0,0233	0,0241	0,0257	0,0277	0,0317	0,0440
100	0,0306	0,0316	0,0357	0,0408	0,0511	0,0819

происходит значительного увеличения коэффициента теплопроводности; при наличии в материале пер до 3 мм коэффициент теплопроводности воздуха вырастает почти в два раза. Конвекция усиливается, если поры соединяются друг с другом, образуя сквозные каналы, в которых создается высокая подвижность воздуха. Поэтому менее теплопроводны материалы с мелкими замкнутыми порами, в то же время такие материалы могут характеризоваться относительно высокой долей радиационного теплообмена.

Неодинаковостью структуры некоторых материалов в разных направлениях объясняется анизотропность этих материалов. Так, теплопроводность дерева вдоль волокон почти вдвое больше, чем поперек волокон. При очень мелких порах материал по своей структуре приближается к однородному телу, в этом случае теплопроводность по оболочкам приобретает большое значение. Это означает, что материалы должны иметь свои оптимальные размеры пор и оптимальную объемную массу, которым соответствует минимальный для данного материала коэффициент теплопроводности. Такого рода закономерность наблюдается, например, при укладке сыпучих или волокнистых материалов при различной степени их уплотнения. Если материал уложен недостаточно плотно, то возрастает конвективный и радиационный теплообмен, что приводит к повышению теплопроводности.

Влиянием конвекции и лучеиспускания в процессе передачи теплоты через теплоизоляционный материал объясняется возрастание коэффициента теплопроводности  $\lambda$  с повышением температуры. На это указывают и данные табл. 3.1, по которым можно судить и о том, что в крупных порах теплопроводность воздуха растет при повышении температуры значительно быстрее. Повышение температуры вызывает и рост радиационного теплообмена, поскольку излучение пропорционально четвертой степени абсолютной температуры. Однако, как следует из опытных данных, коэффициент теплопроводности теплоизоляционных материалов находится примерно в линейной зависимости от температуры, т. е.

$$\lambda_i = \lambda_0 \cdot (1 + b \cdot t) \quad (3.5)$$

где  $\lambda_0$  — коэффициент теплопроводности при 0°С;  $b$  — температурный коэффициент теплопроводности материала, К<sup>-1</sup>.

Коэффициент  $b$  для различных материалов имеет величину  $(2-4) \cdot 10^{-3}$  К<sup>-1</sup>, а потому теплопроводность теплоизоляционных материалов соответственно изменяется от 20 до 40% на каждые 100 К повышения или понижения температуры. Для низкотемпературных установок это свойство материалов оказывается весьма положительным.

2. Теплоизоляционные материалы должны обладать малой гигроскопичностью и малым водопоглощением. *Гигроскопичностью* называется свойство материалов поглощать (сорбировать) водяной пар, а *водопоглощением* — поглощать капельно-жидкую воду. Этими свойствами

различные материалы обладают в разной степени, но в результате их проявления влажность материалов возрастает.

Влажность материала характеризуется содержанием в нем свободной, т. е. химически не связанной воды. Численное значение влажности зависит от выбора количественной единицы измерения. Различают массовую и объемную влажность материала. Массовая влажность может быть отнесена к массе сухого или к массе влажного материала.

Экспериментально влажность определяют высушиванием навески материала массой не менее 5 г в сушильном шкафу при температуре 105—110° С. Длительность высушивания определяют периодическим взвешиванием навески. При достижении образцом постоянной массы его высушивание прекращают.

Если массу образца влажного материала до сушки обозначить через  $g_{м.в.}$ , а массу образца после высушивания — через  $g_{м.с.}$ , то масса влаги  $g_в$ , содержащейся в материале, окажется  $g_в = g_{м.в.} - g_{м.с.}$ . Массовая влажность  $x$ , отнесенная к массе сухого материала,

$$x = g_в / g_{м.с.} = (g_{м.в.} - g_{м.с.}) / g_{м.с.}$$

а массовая влажность  $\xi$ , отнесенная к массе влажного материала,

$$\xi = g_в / g_{м.в.} = (g_{м.в.} - g_{м.с.}) / g_{м.в.} \quad (3.7)$$

Для пересчета из одного вида задания влажности в другой выражение (3.6) можно представить в виде  $x = g_в / (g_{м.в.} - g_в)$  и разделить числитель и знаменатель дроби на  $g_{м.в.}$ . Тогда ,

$$x = \xi / (1 - \xi) \text{ и } \xi = x / (1 + x).$$

Из выражения (3.7) следует, что  $\xi$  может изменяться в пределах от 0 до 1, а  $x$ , как это следует из формулы пересчета, ограничен пределами 0 и  $\infty$ . Для сопоставления приведены значения влажности, отнесенной к массе сухого материала, соответствующие некоторым величинам влажности, отнесенной к массе влажного материала,

$\xi, \%$ .....	0	25	50	75	100
$x, \%$ .....	0	33	100	300	$\infty$

*Объемной влажностью* материала называется отношение объема влаги, содержащейся в образце материала, к объему самого образца. В этом определении вся влага независимо от того, в каком агрегатном состоянии она находится в материале, считается по объему капельной водой. Кроме того, предполагается, что при поглощении воды объем материала не изменяется.

Объем ( $m^3$ ), занимаемый влагой в материале,  $V_в = g_в / \rho_в = g_в / 1000$ , а объем, занимаемый образцом материала,  $V_м = g_{м.с.} / \rho_{об.м.с.}$

Тогда объемная влажность

$$w = V_в / V_м = g_в \cdot \rho_{об.м.с.} / (1000 g_{м.с.}) = x \cdot \rho_{об.м.с.} / 1000 \quad (3.8)$$

Из выражения (3.8) следует, что численное значение объемной влажности  $w$  для материалов с объемной массой до 1000 кг/ $m^3$  всегда меньше численного значения массовой влажности  $x$  и что разница между этими величинами тем больше, чем легче материал.

Поглощение влаги материалом ведет прежде всего к ухудшению тепловых свойств материала. Объясняется это тем, что вода может занимать в материале часть объема ячеек и пор, вытесняя из них газ. Так как теплопроводность воды  $\lambda_w = 0,58$  (Вт/мК) примерно в 25 раз больше теплопроводности неподвижного воздуха, то наличие воды в материале вызывает существенное повышение теплопроводности теплоизоляционного материала. При низких температурах вода в порах материала может замерзнуть, что приведет к еще большему возрастанию теплопроводности материала, так как теплопроводность льда  $\lambda_l = 2,2$  Вт/(мК) почти в 100 раз больше теплопроводности неподвижного воздуха.

Зависимость теплопроводности материала от объемной влажности может быть выражена эмпирической формулой

$$\lambda_s = \lambda_{с.м.} + \Delta\lambda \cdot w$$

где  $\lambda_{с.м.}$  — коэффициент теплопроводности материала в воздушно-сухом состоянии.  $\Delta\lambda$  — приращение коэффициента теплопроводности на каждый процент увеличения объемной влажности;  $w$  — объемная влажность, %.

Величину  $\Delta\lambda$  органических материалов при положительных температурах принимают равной  $3,5 \cdot 10^{-3}$ , а при отрицательных температурах  $4 \cdot 10^{-3}$  Вт/(мК); неорганических материалов — соответственно  $2,3 \cdot 10^{-3}$  и  $3,5 \cdot 10^{-3}$  Вт/(мК).

Содержащий влагу изоляционный материал может подвергаться гниению, в нем могут образовываться грибки и плесени, что приводит к разрушению материала и сокращению срока его службы.

3. Теплоизоляционные материалы должны быть температуростойкими и морозостойкими. Это значит, что материалы не должны становиться хрупкими при низких температурах и, кроме того, должны сохранять прочность и эластичность каркаса, подвергаясь многократному замораживанию и оттаиванию в увлажненном состоянии, т. е. при наличии воды в порах. Увеличение объема воды при ее замерзании в порах материала не должно вызывать образования трещин в материале или его разрушения.

4. Теплоизоляционные материалы должны быть негорючими или обладать возможно меньшей горючестью.

5. Теплоизоляционные материалы должны быть химически инертными по отношению к материалам, с которыми они могут контактировать в изоляционной конструкции, например не вызывать коррозию стальных стенок аппарата, на наружную поверхность которого наложен теплоизоляционный слой данного материала.

6. Теплоизоляционные материалы не должны иметь запаха или воспринимать запахи. Это качество существенно для пищевых предприятий, поскольку многие скоропортящиеся пищевые продукты легко воспринимают различные запахи, что ухудшает их потребительское качество. Некоторые же продукты (например, рыба) сами обладают запахом, который может быть воспринят теплоизоляционным материалом и передан другим продуктам, которые будут затем храниться в охлаждаемом помещении.

7. Теплоизоляционные материалы должны обладать способностью противостоять грызунам и не должны привлекать их. Грызуны не только портят изоляцию и хранящиеся продукты, но и способствуют распространению заразных заболеваний.

8. Теплоизоляционные материалы должны обладать достаточной механической прочностью, чтобы выдерживать воздействия, неизбежные во время транспортировки, укладки и в процессе эксплуатации (нагрузка от продуктов, удары, вибрации).

9. Теплоизоляционные материалы должны легко обрабатываться (разрезаться, пилиться и т. д.) обычными режущими инструментами.

10. Теплоизоляционные материалы должны обладать удовлетворительными экономическими показателями. При прочих удовлетворительных свойствах высокая стоимость материала или его малые ресурсы ограничивают возможности применения такого материала.

Материалов, обладающих в равной и полной степени всеми перечисленными свойствами, пока не существует. Поэтому выбор теплоизоляционных материалов производится не только с учетом их положительных и отрицательных качеств, но иногда и реальной возможности получения материала на месте строительства, а также в зависимости от значения и назначения объекта.

Правильному выбору материалов для тепловой изоляции помогает классификация их по отдельным характерным признакам. Теплоизоляционные материалы следует классифицировать прежде всего по их тепловой эффективности, т. е. по величинам коэффициента теплопроводности и объемной массы. По этому признаку теплоизоляционные материалы можно разбить на четыре группы:

1) высокоэффективные материалы с коэффициентом теплопроводности в сухом состоянии до  $0,045 \text{ Вт/(мК)}$  и с объемной массой до  $100 \text{ кг/м}^3$ ;

2) эффективные материалы с коэффициентом теплопроводности от  $0,045$  до  $0,080 \text{ Вт/(мК)}$  и с объемной массой  $100\text{—}350 \text{ кг/м}^3$ ;

3) материалы средней эффективности с коэффициентом теплопроводности от  $0,080$  до  $0,180 \text{ Вт/(мК)}$  и с объемной массой  $350\text{—}650 \text{ кг/м}^3$ ;

3) материалы низкой эффективности с коэффициентом теплопроводности от  $0,18$  до  $0,35 \text{ Вт/(мК)}$  и с объемной массой  $650 - 1000 \text{ кг/м}^3$ .

Собственно теплоизоляционными материалами являются материалы первых трех групп и они главным образом находят применение в холодильном строительстве. Материалы четвертой группы относятся к сравнительно легким строительным материалам, а в качестве теплоизоляционных используются только в том случае, если это местные материалы и если расчетом доказано, что их применение для изоляции более экономично, чем материалов первых групп.

Внутри каждой из указанных групп материалы могут классифицироваться и по другим признакам. По происхождению или по исходному сырью материалы делятся на две группы: органического и неорганического происхождения (минералы, металлы). В каждой, из групп материалы могут быть естественными или искусственными. Материалы органического происхождения, за исключением некоторых искусственных, как правило, гигроскопичны и влагоемки, вследствие чего они могут гнить, плесневеть. В большинстве случаев они горючи.

Следует учитывать и температурную область, внутри которой может быть применен данный теплоизоляционный материал. По этому признаку все материалы можно разделить на две группы.

1. Материалы для низких температур (область отрицательных температур и до  $+80^{\circ}\text{C}$ ). В области низких температур некоторые материалы становятся хрупкими. У верхнего температурного предела может происходить изменение структуры и механических свойств ряда материалов в результате размягчения вяжущих связок (битума, смол), обугливания органических веществ и т. п.
2. Материалы для высоких температур (от  $80^{\circ}\text{C}$  и примерно до  $500^{\circ}\text{C}$ ) находят применение на теплоэлектростанциях, промышленных тепловых установках, тепловых коммуникациях. Для этого температурного интервала используются главным образом материалы неорганического происхождения.

По внешнему виду или способу применения в изоляционной конструкции теплоизоляционные материалы классифицируются на такие группы.

1. Штучные жесткие изделия, имеющие определенные размеры и форму; при выполнении изоляционных работ форму таких изделий обычно не изменяют. Для изоляции плоских поверхностей они могут быть в виде плит, блоков и кирпичей. Для изоляции криволинейных поверхностей (сосудов цилиндрической формы, трубопроводов) штучные жесткие изделия изготавливают в виде сегментов, брусков с трапециевидным сечением, скорлуп (полуцилиндрических оболочек). Производятся и изделия сложной конфигурации, предназначенные для изоляции фасонных частей трубопроводов (вентилей, тройников, угольников и т. п.).

2. Штучные гибкие изделия, имеющие определенные размеры, но форму этих изделий можно в некоторой степени изменять. Они производятся в виде матов, листов, рулонов и шнура. Такие изделия используются для изоляции как плоских, так и криволинейных поверхностей.

3. Сыпучие или засыпные материалы, представляющие собой рыхлую бесформенную массу с произвольным расположением частиц. Материалы могут быть зернистого строения (зерна, опилки), порошкообразного и волокнистого (нити, волокна). Они могут применяться для изоляции поверхностей любой формы; при проведении изоляционных работ материал засыпается между двумя стенками, одной из которых является изолируемая поверхность, а другая, вспомогательная, отстоит от нее на размер необходимой толщины теплоизоляционного слоя и повторяет форму изолируемой поверхности или выполняется более простой формы.

4. Материалы, которые в конечном виде получают в самом процессе выполнения теплоизоляционных работ, например напылением на изолируемую поверхность или заливкой исходной смеси и изолируемое пространство. Благодаря такой технологии получения, теплоизоляционного слоя они могут применяться для изоляции поверхностей любой конфигурации, даже очень сложной. Высокоэффективные материалы благодаря своей малой объемной массе находят применение прежде всего в транспортных и других передвижных установках, в устройствах и аппаратах, для которых на первое место выдвигается требование минимальной массы. Так как материалы этой группы обладают малой тепловой инерцией (малым коэффициентом теплоусвоения), их успешно применяют в установках с переменным тепловым режимом (низкотемпературные испытательные камеры, регенеративные теплообменники в криогенных установках). В связи с возрастающим в последние годы производством материалов из искусственных смол с хорошими показателями они находят все большее применение на крупных промышленных установках. Большинство высокоэффективных материалов имеет малую механическую прочность. Материалы данной группы можно разделить на несколько подгрупп.

1. Органические естественные материалы. К ним относятся различные породы растительных волосков или растительного пуха, находившие ранее применение, но теперь редко используемые.
2. Органические искусственные материалы. Очень перспективными материалами этой подгруппы являются пенопласты, получаемые путем вспенивания синтетических смол.

Пенопласты имеют мелкие замкнутые поры и этим отличаются от поропластов — тоже вспененных пластмасс, но имеющих соединяющиеся (незамкнутые) поры и потому не используемых в качестве теплоизоляционных материалов. В зависимости от рецептуры и характера технологического процесса изготовления пенопласты могут быть жесткими, полужесткими и эластичными с порами необходимого размера; изделиям могут быть приданы желаемые свойства (например, уменьшена горючесть).

Пенопласты делятся на термопластичные, или термообратимые, размягчающиеся при повторных нагреваниях, и термонепластичные, или термонеобратимые, отвердевающие при первом цикле нагревания и не размягчающиеся при повторных нагреваниях; к первым относятся пенополистиролы (ПС) и пенополивинилхлориды (ПХВ), ко вторым — пенополиуретаны (ПУ), а также материалы на основе фенолоформальдегидных (ФФ), эпоксидных (Э) и кремнийорганических (К) смол.

По виду технологического процесса производства пенопласты делятся на формуемые (получаемые прессовым методом) и на вспенивающиеся в конструкции (получаемые беспрессовым методом). При прессовом методе порошкообразный полимер с добавленным к нему твердым газообразователем (порофором) прессуется в пресс-формах на гидравлическом прессе под давлением 10—20 МПа и при нагревании до 150—175° С; при этом пластмасса плавится, а газообразователь разлагается. В полученной после прессования заготовке газ находится под большим давлением и может диффундировать во внешнюю среду; по этой причине заготовки хранят не больше 1—2 суток. В качестве газообразователя применяют бикарбонат натрия, карбонат аммония, выделяющие двуокись углерода, а также некоторые вещества, выделяющие азот. Из заготовок получают плиты и другие изделия путем нагревания заготовок в формах до высокоэластичного состояния (100—120° С); в этих условиях газ выделяется и вспенивает пластмассу, образуя поры. По этому способу производят изделия из термопластичных пластмасс марок ПС-1, ПС-4, ПХВ-1, ПХВ-2. Они имеют коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0,030-0,045$  Вт/(мК) при объемной массе 40-80 кг/м<sup>3</sup>.

Беспрессовый способ имеет две основные разновидности. По одной из них получают наиболее легкие пенополистиролы. В качестве газообразователей здесь применяют легкокипящие жидкости (изопентан, хлористый метилен, хладоны), которыми насыщают в автоклавах гранулы полимера (зерна диаметром 0,2—0,5 мм) под давлением. Гранулы можно засыпать в формы (для получения плит и других изделий) или в пространство между двумя стенками изолируемого объема аппарата, конструкции. При последующем нагревании (водяным паром в поле тока высокой частоты) до высокоэластичного состояния гранулы вспениваются, расширяясь примерно в десять раз благодаря выделению газа, и склеиваются между собой. Так производят, например, плиты и скорлупы одного из распространенных пенопластов ПСБ — пенополистирола беспрессового, имеющего  $\lambda = 0,030-0,035$  Вт/(мК) при объемной массе  $\rho_{об} = 25-35$  кг/м<sup>3</sup>; он горит коптящим пламенем. Отечественная промышленность выпускает и самозатухающий пенопласт ПСБ-С.

По другой разновидности беспрессового способа получают пенополиуретан. Газообразование в этом методе происходит при смешении в жидком состоянии двух частей композиции во время заливания их в изолируемый объем (например, между двумя стенками конструкции ограждения) или во время нанесения (набрызгиванием, напылением) теплоизоляционного слоя на изолируемую поверхность. Объем исходной смеси при этом увеличивается в 30—40 раз. Напыление смеси производят пульверизатором (пистолетом-распылителем), что делает этот способ высокопроизводительным и наиболее технологичным, особенно при изоляции сложных конструкций (например, корпуса судна холодильника). За один проход образуется слой толщиной 15—25 мм. Пенополиуретан наносится на поверхность любого материала и хорошо приклеивается к ней. В месте прилегания к изолируемой поверхности образуется плотная пленка, обладающая пароизоляционными свойствами. Наибольшую прочность образовавшийся теплоизоляционный слой приобретает через 24 ч после напыления. Коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0,035-0,040$  Вт/(мК) при объемной массе 50—60 кг/м<sup>3</sup>. При заливании частей композиции в изолируемый объем в качестве пенообразователя нередко применяют хладон-11 или хладон-12. В этом случае коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0,019-0,021$  Вт/(мК).

Пенопласты имеют, по данным изготовителей, малую гигроскопичность (1—2%) и малое водопоглощение (до 20%), хотя при проверке ПСБ-С после нескольких лет работы в ограждении холодильника были получены более высокие значения. Предел прочности на сжатие 15—50 Н/см<sup>2</sup>.

К пенопластам может быть отнесена и мипора, известная также под названиями твердая пена, ипорка, находившая применение и малых установках. Это белоснежный мелкопористый материал, получаемый из смеси формальдегида и искусственной мочевины с добавкой пенообразующих веществ при температуре около  $95^{\circ}\text{C}$ . Изготавливается в виде блоков объемной массой  $15\text{—}25\text{ кг/м}^3$ . Однако мипора имеет высокое водопоглощение (до 500%), очень низкую механическую прочность, она горюча и при ее горении выделяются ядовитые газы, при увлажнении быстро загнивает.

3. Неорганические материалы. Представителем этой подгруппы является алюминиевая фольга (альфоль). Для тепловой изоляции используют фольгу толщиной  $7\text{—}20\text{ мкм}$ . Она применяется в виде гофрированных (мятых) листов с деревянными рамками (иногда листы наклеиваются на картон), уложенных с образованием воздушных прослоек толщиной  $8\text{—}10\text{ мм}$  обычно до десяти рядов. Объемная масса гофрированной фольги  $6\text{—}8\text{ кг/м}^3$ , но из-за наличия конструктивных элементов для крепления листов и образования зазоров между листами объемная масса изоляции возрастает и доходит до  $100\text{ кг/м}^3$ . Достоинством этого материала является высокая отражательная способность, уменьшающая радиационный теплообмен, что особенно заметно при высоких температурах.

Другими важными представителями подгруппы неорганических материалов являются искусственные волокна: минеральная, шлаковая и стеклянная вата. Сырьем для минеральной ваты служат горные породы (мергели, доломиты, базальты и др.), для шлаковой — доменный шлак, а для стеклянной ваты — материалы, из которых получают различные виды стекла (кварцевый песок, известь, сода). Исходную шихту расплавляют в вагранках или в ваннах, печах. Для получения волокон из расплава чаще применяется фильерно-дутьевой способ, в котором расплав поступает сначала в платиновый питатель, имеющий большое число фильерных отверстий (диаметром  $1,8\text{ мм}$ ), а вытекающие из них струйки расплава разбиваются струей водяного пара или горячего воздуха, выходящей из сопла со скоростью до  $600\text{ м/с}$ , на мелкие шарики, которые вытягиваются на лету в нити. Средняя толщина минеральной ваты  $6\text{—}7\text{ мкм}$ . Вата марки 100 имеет объемную массу  $100\text{ кг/м}^3$  и коэффициент теплопроводности  $0,045\text{ Вт/(мК)}$ , а вата марки 150 —  $\rho_{об} = 150\text{ кг/м}^3$  и  $\lambda = 0,047\text{ Вт/(м К)}$ . Стекловолокно обычное теплоизоляционное имеет толщину нитей  $12\text{—}35\text{ мкм}$  и его показатели аналогичны минеральной вате. Выпускается и ультратонкое волокно (УТВ) с диаметром нити около  $1\text{ мкм}$ ; оно при  $\rho_{об} = 6\text{ кг/м}^3$  имеет  $\lambda = 0,031\text{ Вт/(мК)}$ . Минеральная и стеклянная вата могут применяться как засыпной материал, но дают большую усадку. Нагрузка на них не должна превышать  $0,2\text{ Н/см}^2$ . Эти материалы не горючи, не проходимы для грызунов. Они имеют малую гигроскопичность (не больше 2%), но большое водопоглощение (до 600%). При выполнении изоляционных работ необходимо применять защитные меры.

Более удобными для применения оказываются изделия из искусственных волокон, в частности минераловатный войлок на синтетической связке с объемной массой не более  $100\text{ кг/м}^3$  и коэффициентом теплопроводности  $0,043\text{—}0,047\text{ Вт/(мК)}$ . Минераловатный войлок на битумной связке выпускается марок 100, 150 и 250 соответственно его объемной массе.

В эту же подгруппу включается губчатая резина (оназот), изготавливаемая на основе синтетического каучука. Из нее производят, эластичные плиты и скорлупы путем вспенивания расплавленной каучуковой массы азотом или двуокисью углерода под давлением. Одновременно осуществляют вулканизацию каучука. Материал мало гигроскопичен и водоустойчив; благодаря своей эластичности пригоден для изоляции труб и цилиндрических аппаратов. При  $\rho_{об} = 60\text{—}100\text{ кг/м}^3$  имеет  $\lambda = 0,035\text{—}0,050\text{ Вт/(мК)}$ .

В криогенных установках для тепловой защиты оборудования применяются порошковые материалы и различные виды вакуумной изоляции. Распространенным порошковым материалом является аэрогель — порошкообразный высокопористый материал, состоящий в основном из химически чистого двуоксида кремния. Его характеризует низкая теплопроводность, более низкая, чем у спокойного воздуха. Объясняется это тем, что диаметр пор аэрогеля ( $1,8 \cdot 10^{-7}\text{ мм}$ ) значительно меньше длины свободного пробега молекул воздуха ( $1 \cdot 10^{-4}\text{ мм}$  при  $0,1\text{ МПа}$ ), в силу чего колебания молекул воздуха в порах уменьшаются и интенсивность конвективного теплообмена резко снижается. Аэрогель имеет объемную массу  $80\text{—}100\text{ кг/м}^3$  и коэффициент теплопроводности  $0,021\text{—}0,023\text{ Вт/(мК)}$ . При увлажнении аэрогеля происходят необратимые его изменения, а потому он должен тщательно защищаться от проникновения влаги. (Обычно его

засыпают в герметичный объем между двумя металлическими стенками. Различают три вида вакуумной изоляции. Первый из них называется порошково-вакуумной изоляцией. Отличается он от порошковой тем, что в объеме куда засыпан аэрогель (или другой порошковый материал), создается разрежение; при остаточном давлении  $1,33 \text{ Па}$  ( $1 \cdot 10^{-2}$  мм рт. ст.) коэффициент теплопроводности аэрогеля будет в десять раз меньше, чем у воздуха в нормальных условиях, т. е.  $0,23 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(мК)}$ . Вторым видом такой изоляции является вакуумная изоляция. В этом случае в пространстве между двумя герметичными стенками, ограждающими изолируемый аппарат, создается необходимое разрежение; так, тот же коэффициент теплопроводности  $0,23 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(мК)}$  достигается при остаточном давлении  $1,33 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$  ( $1 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст.). Третий вид вакуумной изоляции называется слоисто-вакуумной изоляцией; она состоит из чередующихся слоев тонкого стекловолокна и листов алюминиевой фольги. На 1 см толщины изоляции приходится от 20 до 30 слоев. Тот же коэффициент теплопроводности достигается при остаточном давлении  $1,33 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$  ( $1 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст.) и  $0^\circ\text{C}$ . При криогенных температурах коэффициент теплопроводности такой изоляции уменьшается еще в десятки раз.

Эффективные материалы широко применяются в промышленном строительстве для изоляции ограждений аппаратов и трубопроводов. Материалы этой группы разбиваются на подгруппы.

1. Органические естественные материалы. К ним прежде всего следует отнести пробку, получаемую из коры пробкового дуба и родственного ему бархатного дерева. Кора этих деревьев обладает высокопористой структурой. Так, в  $1 \text{ см}^3$  пробки оказывается до 1 млн. пор диаметром  $25\text{—}40$  мкм. Стенки пор пропитаны смолистым веществом — суберином, которое делает их водонепроницаемыми. Для нужд тепловой изоляции идут отходы пробочного производства, которые дробятся на крошку с зернами различной величины. Пробковая крошка применяется иногда в качестве засыпной изоляции. Из крошки прессованием изготавливают плиты и скорлупы. Пробковые изделия выпускаются двух видов. Первый вид — обыкновенную пробку — получают прессованием с добавлением связок (битума, клея) и последующей сушкой при  $150^\circ\text{C}$ . Она имеет светло-коричневый цвет и объемную массу  $280\text{—}350 \text{ кг/м}^3$ . Лучший вид пробки — экспанзит — получают прессованием и сушкой без доступа воздуха при температуре до  $300^\circ\text{C}$  и без добавления вяжущих веществ. При таком нагревании пробковая крошка разбухает и из нее выделяются продукты сухой перегонки пробки, которые склеивают отдельные зерна. Получается материал с меньшей объемной массой ( $200\text{—}280 \text{ кг/м}^3$ ), темного цвета и с запахом горелого. Экспанзит менее гигроскопичен, чем обыкновенная пробка, меньше подвергается гниению и более долговечен. Пробка — хороший материал, но далеко не идеальный. Она горюча, имеет немалую объемную массу, подвергается гниению, разрушается грызунами. Пробка является ограниченно доступным материалом. Современные пенопласты по многим показателям превосходят пробку.

Широкое применение в холодильном строительстве имели изделия из торфа-сфагнома (мало разложившиеся верхние слои болотного мха). Из торфа производят штучные изделия, главным образом торфоплиты. Коэффициент теплопроводности торфоплит  $0,058\text{—}0,081 \text{ Вт/(мК)}$  при объемной массе  $170\text{—}275 \text{ кг/м}^3$ . Торфоплиты делятся на изготовленные сухим и мокрым способом, причем плиты, изготовленные мокрым способом, по качеству выше. Торфоплиты имеют много недостатков. Они обладают существенным водопоглощением (до  $180\%$ ), склонны к гниению и образованию плесеней, горючи, причем способны тлеть без доступа воздуха (непродитанные плиты), так как содержат кислород в количестве, достаточном для горения. В связи с этим торфоплиты находят теперь ограниченное применение.

К материалам этой группы относятся также изделия из древесины или отходы от обработки древесины, которые являются менее теплопроводными, чем сама древесина. Это древесные опилки и стружка, имеющие объемную массу  $120\text{—}150 \text{ кг/м}^3$ . Изготавливают теплоизоляционные материалы и из продуктов переработки древесины, например теплоизоляционные древесноволокнистые плиты, бумажная литая изоляция (бумлитиз). Сюда же могут быть отнесены такие теперь малоиспользуемые материалы, как гофрированный картон и гофрированная бумага.

2. Неорганические искусственные материалы. Материалы этой группы представляют большой интерес для холодильного строительства, так как им в значительно меньшей степени присущи существенные недостатки органических материалов. К ним относятся прежде всего изделия из стеклянной и минеральной ваты. Из стеклянной ваты изготавливают маты и полосы, которые сверху и снизу покрывают корочкой толщиной около  $1,5$  мм, образованной волокнами, проклеенными клеящим веществом. Корочка предохраняет изделие при перевозке и монтаже. Маты и полосы

прошивают нитками из стеклянного волокна или тонкой стальной проволокой. Из минеральной и шлаковой ваты производят такие распространенные теплоизоляционные материалы, как полужесткие и жесткие минераловатные плиты. Они сходны по технологии производства, но различаются содержанием битума, связывающего волокна. В полужестких плитах от 8 до 20% битума. К волокнам ваты подмешивается расплавленный тугоплавкий битум, и образующиеся маты подпрессовываются и подсушиваются. Из матов вырезают плиты размером 1000x500 мм. Марки полужестких плит 250, 300, 350 и 400 соответствуют их объемной массе; коэффициент теплопроводности 0,065—0,080 Вт/(мК). Выпускаются также полужесткие и жесткие минераловатные плиты на синтетической связке из фенольных смол. Они имеют меньшую объемную массу (150—175 кг/м<sup>3</sup>) и коэффициент теплопроводности 0,051—0,054 Вт/(мК).

Другим материалом этой группы являются асбовермикулитовые плиты, изготавливаемые из вспученного вермикулита (60%), асбестовых волокон (20%) и битумной эмульсии (20%). Их объемная масса 250 кг/м<sup>3</sup>, коэффициент теплопроводности 0,075—0,085 Вт/(мК). Они морозостойки и огнестойки, а потому находят применение главным образом для устройства противопожарных поясов в ограждениях холодильников.

Теплоизоляционные материалы средней эффективности также находят большое применение в промышленном холодильном строительстве. К ним можно отнести главным образом неорганические искусственные материалы. Наиболее распространенным материалом этой группы является пенобетон, являющийся искусственным камнем. Пенобетон часто изготавливают непосредственно на месте строительства. Для его производства цементное молоко смешивают с мыльной пеной. Цементное молоко представляет собой смесь цемента с водой (суспензию), своеобразную тем, что часть воды вступает с цементом в химическую реакцию гидратации (до 15% воды от массы цемента). Мыльная пена взбивается, например, из канифолиного мыла, растворяемого в воде, до образования мелких ячеек. Для стойкости пены в процессе схватывания цемента в нее добавляют столярный клей. Получается так называемая мыльноклеевая эмульсия. При смешении цементного молока со взбитой пеной цементное молоко обволакивает каждую ячейку мыльной пены тонкой оболочкой. Смесь выливают в формы или в опалубку, где происходит твердение пенобетона и испарение избыточной воды. Более устойчивые виды пенобетона получают при твердении в искусственно созданных условиях. Так называемый пропаренный пенобетон после наполнения форм помещается на 15—20 ч в паровую камеру — в атмосферу насыщенного пара без избыточного давления. Лучший вид пенобетона — автоклавный — получается при твердении пенобетона в автоклавах. Такой пенобетон производят только на специальных заводах и применяют как конструкционный изоляционный материал. Объемная масса термоизоляционного пенобетона от 300 до 500 кг/м<sup>3</sup>, коэффициент теплопроводности от 0,08 до 0,15 Вт/(мК). Изготавливается он в виде блоков. Пенобетон не горюч, мало гигроскопичен (до 8% по массе), имеет малое водопоглощение (до 35%), не гниет, не привлекает грызунов. Недостатком его является структурная нестабильность. При неблагоприятных условиях он покрывается трещинами и даже разрушается. Наибольшее применение пенобетон находит для выполнения внутренних стен; в случае изоляции наружных ограждений холодильников он целесообразен только для помещений нулевых и положительных температур.

Другим материалом этой группы является пеностекло (газостекло), предложенное проф. И. И. Китайгородским. Его производят из отходов стекольного производства и боя стекла. Тонко размолотый бой стекла смешивают с газообразователем (древесным углем, известняком и др.), засыпают в формы и нагревают в печи до спекания стекломассы. При температуре 700—800° С, когда стекло размягчается, газообразующие вещества, разлагаясь, выделяют двуокись углерода, которая равномерно вспучивает вязкую стеклянную массу. Объемная масса пеностекла 200 - 600 кг/м<sup>3</sup> коэффициент теплопроводности 0,06—0,017 Вт/(мК). Его гигроскопичность (2—3%) и водопоглощение (5%) невелики. Пеностекло не горит, не гниет, не привлекает грызунов, его механическая прочность высокая (предел прочности на сжатие 300—500 Н/см<sup>2</sup>). Изготавливают пеностекло в виде блоков.

К материалам этой группы относятся шлаки, являющиеся остатками от сжигания каменного угля в топках (топливные), а также отходами при доменном процессе (доменные). Их применяют как засыпные материалы, чаще всего для изоляции полов, лежащих на грунте.

Лучшим является доменный шлак, применяемый в виде крупных зерен-гранул. Гранулированный шлак получают при выпуске доменного шлака под воду. Его объемная масса от 500 до 900

кг/м<sup>3</sup>, коэффициент теплопроводности 0,16—0,25 Вт/(м·К). Теплоизоляционные материалы низкой эффективности включают такие материалы, которые используются главным образом как строительные, но могут выполнять также функции тепловой изоляции.

1. Органические естественные материалы. К ним относится древесина различной породы.

2. Неорганические естественные материалы. В эту подгруппу включаются естественные легкие камни: арктический туф, известняки, ракушечник, пемза.

3. Неорганические искусственные материалы. К ним относятся легкие, или теплые бетоны. Легкими называются бетоны, в которых в качестве крупного инертного заполнителя применены такие сравнительно легкие материалы, как шлак, пемза и др. В соответствии с видом заполнителя эти бетоны носят название шлакобетон, пемзобетон и т. п.

Таким образом, имеется большое количество теплоизоляционных материалов, из которых может осуществляться выбор в соответствии с назначением холодильной установки, с местными условиями строительства.

### § 3.3.

### СВОЙСТВА ПАРО - И ГИДРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Как говорилось ранее, наличие градиента упругости водяного пара, содержащегося в окружающей среде и в охлаждаемом помещении, вызывает поток пара через ограждение. Кроме того, в ряде случаев возможно поступление влаги в ограждение при соприкосновении капельной воды с материалами. Так, в ограждение может проникать влага из грунта, влага атмосферных осадков, что требует выполнения гидрозащиты материалов, из которых сделаны ограждения.

Защита от проникновения парообразной и капельной влаги выполняется материалами, одновременно являющимися паро- и гидроизоляционными. Пароизоляционные материалы должны отвечать следующим требованиям,

1. Иметь высокое сопротивление паропроонианию, что характеризуется малым коэффициентом паропроонируемости материала.

Количество влаги (кг/с), проникающее через однородное ограждение путем паропроония,

$$W = (\mu/\delta)(p_n - p_{пм})F, \quad (3.9)$$

где  $\mu$  — коэффициент паропроонируемости материала;  $\delta$  — толщина ограждения

Коэффициент  $\mu$ , представляет собой количество водяного пара (кг), проникающее в 1 с через 1 м<sup>2</sup> ограждения толщиной в 1 м при разности парциальных давлений пара по сторонам ограждения в 1 Па. Для пароизоляционных материалов он имеет величину порядка  $1 \cdot 10^{-11}$  кг/(м<sup>2</sup>·с·Па). Сопротивление паропроонианию слоя однородного материала (м<sup>2</sup>·с·Па/кг)  $H = \mu/\delta$ .

2. Не поглощать влагу, что предупреждает гниение материалов и обеспечивает их долговечность.

3. Быть температуроустойчивыми, т. е. не быть хрупкими при низких температурах и не размягчаться при температурах, соответствующих верхней границе рабочего температурного интервала.

4. Не иметь запаха.

Основным пароизоляционным материалом является битум (асфальтовый гудрон), который находит и самостоятельное применение и является важнейшей составляющей многих пароизоляционных материалов. Встречаются природные битумы, но в основном битумы получают искусственным путем в виде жидких и твердых остатков при перегонке нефти. Твердые нефтяные битумы (БН) выпускаются нескольких марок, различающихся главным образом по температуре размягчения; под ней понимают температуру, при которой битум переходит из твердого состояния в пластично-текучее. Битумы, имеющие температуру размягчения, до 50 °С, называются *легкоплавкими*, а выше 50 °С — *тугоплавкими*. Другой характеристикой битумов, определяющей их вязкость, является пенетрация (проникновение); мерой пенетрации считают глубину в десятых долях миллиметра, на которую проникает в вязкое тело игла с грузом в 100 г в течение 5 мин при температуре испытуемого материала 25° С. В холодильном строительстве применяют главным образом нефтяные битумы последних трех-четырех марок (табл. 3.2).

Коэффициент теплопроводности битума 0,30—0,35 Вт/(м·К)

Как видно из таблицы, битумы с более высокой температурой размягчения оказываются значительно менее вязкими, что вызывает трудности при нанесении пароизоляционного слоя. Битум БН-III размягчается от прямых солнечных лучей, а БН-V — растрескивается при низких температурах. Для теплоизоляционных и пароизоляционных работ чаще всего используют битум БН-IV.

### Характеристики нефтяных битумов

Таблица 3.2

Марка битума	БН-III	БН-IV	БН-V	БН-VK
Температура размягчения, °С	45	70	90	90
Пенетрация, 10 <sup>-1</sup> мм	40 - 70	21 - 40	5 - 20	20
Температура вспышки, °С	200	230	230	230
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1000	1000	1000	1000

Для создания нужных свойств нередко применяют композиции из битумов двух марок, в частности БН-III и БН-V, в равных долях.

По способу производства пароизоляционных работ пароизоляционные материалы могут быть окрасочные (обмазочные) и оклеечные. Битум относится к окрасочным материалам. Его наносят на поверхность в расплавленном состоянии щетками (кистями) вручную, в один или несколько слоев общей толщиной от 1 до 5 мм. Для расплавления битум разогревают в баках до температуры 160—170° С, применяя электрический подогрев, и поддерживают эту температуру во время работы. Наносить битум следует только на сухую и чистую поверхность, что задерживает выполнение изоляционных работ. Делаются попытки наносить расплавленный битум при помощи пульверизаторов.

Более производительным способом, позволяющим создать пароизоляционный слой более высокого качества, оказывается окраска поверхности битумной эмульсией или битумной мастикой. Битумная эмульсия представляет собой мелкодисперсные частицы битума, находящиеся в воде во взвешенном состоянии. В состав эмульсии входят эмульгаторы (мыло, некоторые сорта глины и др.), обволакивающие поверхности частиц битума тонкой оболочкой и тем самым препятствующие слипанию их в крупные частицы. Для образования эмульсии битум в расплавленном состоянии дробится в воду на частицы размером около 5 мкм в центрифугах при большой скорости вращения или в ультразвуковых диспергаторах. В составе эмульсии 50% воды, 48% битума, 1,5% эмульгатора и 0,5% щелочи. Эмульсию наносят на поверхность разбрызгиванием из пульверизатора (пистолета-распылителя). После испарения воды частицы битума слипаются в сплошную ровную пленку. После высыхания первого слоя можно наносить следующий (до трех-четырех слоев). Эмульсия может наноситься и на влажную поверхность. Недостатком битумных слоев является недостаточная эластичность, из-за чего при низких температурах на битуме появляются волосные трещины, значительно увеличивающие паропроницаемость слоя. Для придания эластичности и морозостойкости слоям битумной эмульсии в нее добавляют латекс (водная эмульсия в данном случае синтетического каучука).

Широкое применение находят битумные мастики. Они встречаются двух разновидностей: горячие (твердые) и холодные (пластичные). В обоих случаях мастики представляют собой смесь битума с наполнителями, придающими мастикам эластичность. В качестве наполнителей применяют волокнистые материалы (асбест) и пылевидные материалы (мелкий или молотый песок, известь и др.). Для приготовления горячих мастик расплавленный битум (80—85%) смешивают с различными наполнителями, желательно и с волокнистыми, и с пылевидными. Для придания пластичности в мастику добавляют соляровое масло и латекс. Горячие мастики можно применять в качестве обмазочной пароизоляции, а также приклеивающего слоя для гидроизоляции из битумных рулонных материалов, а также для покрытия кровель но беспокровным рулонным материалам. При проведении работ мастику расплавляют при температуре 120—180° С и наносят на поверхность или вручную, или механическим распылением. При механизированном нанесении

пароизоляционного слоя увеличиваются плотность, долговечность и адгезионные свойства пароизоляции, а трудовые затраты уменьшаются в 5—10 раз.

Холодная мастика состоит из битумной эмульсии (50%), асбестовых волокон (25%) и песка (25%). На поверхности ее наносят также, как штукатурку, слоем 5—10 мм. Мастика может наноситься и на холодные, и на влажные поверхности. Особенно целесообразно ее применение в качестве пароизоляционного материала для пароизоляции холодных трубопроводов.

К оклеечным пароизоляционным материалам относятся различные битумные и не битумные рулонные и листовые материалы.

1. Битумные материалы с органической основой. Такими материалами являются пергамин и рубероид. Пергамин — это кровельный картон, пропитанный легкоплавким битумом с толщиной листов 0,5—0,7 мм. Рубероид — кровельный картон, пропитанный легкоплавким битумом и с одной или с двух сторон покрытый слоем тугоплавкого битума, в связи с чем рубероид называют покровным рулонным материалом, а пергамин — беспокровным. Толщина рубероида 1,5 мм. Для внутренней пароизоляции нельзя применять толь, так как он представляет собой кровельный картон, пропитанный каменноугольными дегтепродуктами, которые обладают сильным запахом. В связи с этим в холодильном строительстве толь применяют только как наружный гидроизоляционный или кровельный материал. Недостатком этих материалов является возможность гниения их основы и вследствие этого уменьшение долговечности пароизоляционного слоя. В связи с этим материалы с гниющей основой должны применяться главным образом для небольших установок и неответственных сооружений.

2. Материалы с неорганической (негниющей) основой. К ним относятся гидроизол, фольгоизол, стеклоизол, стеклорубероид. Гидроизол — это беспокровный рулонный материал, изготовленный путем пропитки асбестового картона битумами. Толщина листов около 1 мм. При изготовлении фольгоизола алюминиевая фольга толщиной 0,2—0,3 мм покрывается с одной стороны битумно-резиновым составом. Толщина листов до 4 мм. Стеклорубероид и стеклоизол имеют одинаковую основу — стекловолокнистую ткань, но стеклорубероид получают нанесением на ткань битума, а стекло-изол — битумно-резиновой массы. Толщина листов 2—3 мм.

3. Безосновные материалы. К ним относятся изол и бризол, которые изготавливают прокатыванием через вальцы смеси нефтяных битумов с наполнителем (асбестовые волокна и тальк) и с дробленой старой резиной. Выпускаются толщиной 2,0 мм, шириной 450 мм (бризол) и 800—1000 мм (изол). Их отличает высокая пластичность при низких температурах.

Материалы последних двух групп обладают высокой паронепроницаемостью, водостойкостью долговечностью и применяются в ответственных сооружениях. Для пароизоляции применяются и небитумные материалы, в частности полимерные пленочные материалы, например полиэтиленовые и поливинилхлоридные пленки (толщиной 0,2 мм). Их недостатком является быстрое старение и трудность наклеивания. Лучшие результаты дает применение дублированных пленок типа пленка—бумага или пленка—фольга—бумага. Хорошим средством защиты изоляции от увлажнения является облицовка поверхности стен глазурованными плитками. Идеальными пароизоляционными материалами являются металлы, которые приходится использовать в низкотемпературных малых установках. Для сопоставления величин коэффициентов паропроницаемости строительных, тепло- и пароизоляционных материалов в табл. 3.3 приведены эти данные для некоторых материалов.

Для приклеивания неполимерных теплоизоляционных материалов и пароизоляционных материалов к изолируемым поверхностям применяют расплавленную горячую битумную мастику. Но для приклеивания полимерных материалов она не годится из-за высокой температуры расплавления, при которой происходят необратимые изменения этих материалов. Для приклеивания пенополистирола и синтетических пленок используют или битумную мастику с температурой расплавления 70—80° С, или клеи. Температуру размягчения битумной мастики понижают добавлением органических растворителей (бензина, керосина, толуола и др.); отверждение мастики происходит при испарении растворителя. Находят применение и различные клеи, такие, как клей КБ 3 на основе фенолоформальдегидной смолы, мастика ДФК-П на основе дифенолкетонных смол, мастика КН-2, латексный клей и клей СП-1 на основе синтетических каучуков.

**Таблица 3.3 Коэффициенты паропроницаемости некоторых материалов**

Материалы	Коэффициент паропроницаемости	
	$10^{12}$ кг / (м.с.Па)	$10^4$ г / (м.ч. мм рт. ст.)
<i>Строительные</i>		
Бетон	8,4	40,0
Кирпич	29,3	140,0
Штукатурка известковая	37,6	180,0
Штукатурка цементная	20,9	100,0
<i>Теплоизоляционные</i>		
Дерево (сосна) перпендикулярно волокнам	17,1	82,0
Минераловатные плиты	94,1	450,0
Стеклянная вата	135,9	650,0
Пенобетон	73,2	350,0
Пенополистирол	13,6	65,0
Пенополиуретан	6,3	30,0
<i>Пароизоляционные</i>		
Алюминиевая фольга	0,0015	0,0072
Битум	0,2400	1,1500
Бризол, изол	0,3450	1,6500
Полиэтиленовая пленка	0,0056	0,027
Рубероид	0,3760	1,8000

#### § 3.4.

### **УВЛАЖНЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ В ОГРАЖДЕНИЯХ ХОЛОДИЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ И БОРЬБА С ЭТИМ ЯВЛЕНИЕМ**

Увлажнение изоляционных материалов в ограждениях на некоторых действующих холодильных предприятиях нередко является причиной резкого ухудшения работы холодильной установки. Поэтому борьба с увлажнением материалов в ограждениях всегда должна быть объектом внимания и проектировщика, и эксплуатационника.

Подавляющее большинство теплоизоляционных материалов поглощает как парообразную, так и капельную воду, и поэтому в обычных условиях они являются влажными. Это связано прежде всего со структурой самих материалов, являющихся капиллярно-пористыми коллоидными телами. Коллоидные тела относятся к мелкодисперсным двухфазным системам. Благодаря большой раздробленности частицы твердой фазы имеют весьма развитую поверхность. В теплоизоляционных материалах частицы дисперсной фазы связаны между собой и образуют более или менее жесткие пространственные структуры - сетки или каркасы, являющиеся оболочками пор и капилляров в материале. При изменении температуры и содержания влаги такие тела изменяют свои физические свойства в степени, зависящей от характера связи материалов с поглощенной жидкостью.

По классификации академика П. А. Ребиндера, все формы связи капиллярно-пористых тел с поглощенной влагой делятся на три большие группы: 1) химическая связь; 2) физико-химическая; 3) физико-механическая. Химическая связь характеризуется наибольшей прочностью и совершенно точными соотношениями между количествами сухого материала и присоединенной влаги, не изменяющимися при изменении внешних условий. Присоединение воды происходит в процессах гидратации и кристаллизации (образование кристаллогидратов). Химически связанная влага не удаляется даже при нагревании материала до 120—150° С.

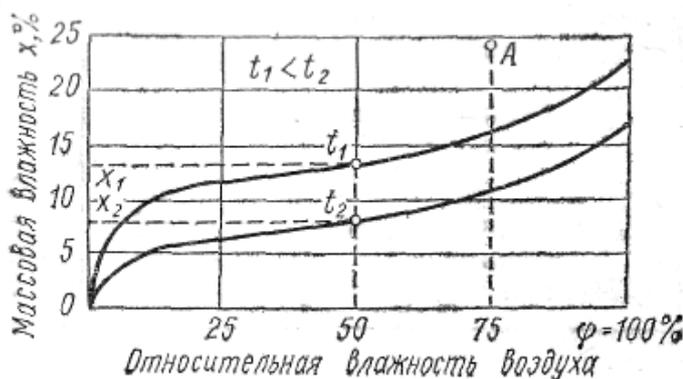
Формам физико-химической связи свойственны различные, но определенные соотношения между количествами сухого материала и влаги, соответствующие условиям внешней среды. Из форм физико-химической связи наибольшее значение имеет адсорбционно-связанная влага (гигроскопическая влага). Поступление гигроскопической влаги в материал и ее продвижение в материале происходит в парообразном состоянии.

Формы физико-механической связи еще менее прочные, и им соответствуют неопределенные соотношения между количествами сухого материала и поглощенной воды, которые, однако, могут иметь предельные значения. Поглощение влаги при таких формах связи происходит при непосредственном соприкосновении материала с капельной влагой. Влагой в формах физико-механической связи являются капиллярная влага, перемещающаяся в микро- ( $r < 0,1$  мкм) и в макрокапиллярах ( $r > 0,1$  мкм), а также влага смачивания, удерживаемая в порах материалов в результате прилипания воды к стенкам оболочек пор. Обе формы физико-механической связи вызваны наличием поверхностного натяжения у жидкостей.

Каждой последующей форме связи влаги с материалом соответствует все возрастающее содержание влаги. Если поступление влаги в материал продолжается, то появляется вода, не имеющая никакой связи с материалом — физически свободная, которая носит название гравитационной влаги, так как она перемещается в материале под действием гравитационных сил и, следовательно, только в одном направлении. Количество водяного пара, которое может сорбировать (поглощать) тот или иной материал, характеризует его гигроскопичность. Этой способностью разные материалы обладают в различной степени.

Адсорбция водяного пара поверхностью частиц оболочек происходит под действием электромолекулярных сил притяжения между молекулами материала и водяного пара. В результате частицы материала покрываются тонкой жидкостной пленкой, толщиной в одну (мономолекулярный слой) или несколько молекул (полимолекулярный слой). Значительные величины электромолекулярных сил притяжения способствуют тому, что частицы воды в пленке, окружающей частицы твердой фазы, находятся под давлением сотен и тысяч мегапаскалей. При большом давлении, под которым находится гигроскопическая влага, температура замерзания этой воды значительно понижается. Часть гигроскопической влаги не замерзает даже при  $-80^{\circ}\text{C}$ .

Если сухой материал находится некоторое время в атмосфере влажного воздуха, то он адсорбирует из воздуха водяной пар в совершенно определенном (для данного материала) количестве, зависящем от состояния воздуха. Видимое поглощение пара из воздуха прекращается при достижении подвижного равновесия между влажным воздухом и влажным материалом. При равновесии давление насыщенного пара над поверхностью водяной пленки в материале оказывается равным парциальному давлению водяного пара в окружающем влажном воздухе. Содержание влаги в материале в состоянии равновесия приобретает некоторое постоянное значение, называемое *равновесной гигроскопической влажностью* или *равновесной влажностью материала*. Материалы, имеющие значительную равновесную влажность, называются *гигроскопичными*. Равновесную влажность материалов определяют опытным путем после выдержки (в течение 1 сут) образцов в атмосфере влажного воздуха различной установленной влажности. Результаты опытов изображаются графически в виде кривых равновесной влажности или изотерм сорбции влаги (рис. 3.3), поскольку процесс сорбции обычно исследуется при постоянной температуре. Ордината любой точки кривой дает величину равновесной влажности



### Рис. 3.3. Характер изотерм сорбции влаги теплоизоляционным материалом

материала, соответствующей данной влажности воздуха. Равновесная влажность материала, отвечающая насыщенному воздуху, называется *максимальной гигроскопической влажностью*. Область в диаграмме выше кривой равновесной влажности является областью капиллярной влажности. Если, например, при  $t_1$  и влажности воздуха  $\varphi = 75\%$  материал имеет влажность, определяемую ординатой точки  $A$ , то можно утверждать, что в материале имеется еще и капиллярная влага. Равновесная влажность материала убывает с повышением температуры ( $x_2 < x_1$ ).

Для иллюстрации в табл. 3.4 приведены величины равновесной влажности некоторых органических и неорганических материалов в интервале температур  $0\text{—}35^\circ\text{C}$ . Данные таблицы подтверждают высокую гигроскопичность материалов органического происхождения по сравнению с неорганическими материалами.

Так как материалы все время находятся в атмосфере влажного воздуха, то гигроскопичные материалы всегда оказываются влажными, т. е. содержат влагу в количестве, определяемом величиной равновесной влажности (воздушно-сухой материал). По этой причине при выполнении расчетов нельзя пользоваться данными для коэффициентов теплопроводности материалов в сухом состоянии, так как материалы всегда содержат некоторое количество влаги, что иногда существенно увеличивает коэффициент теплопроводности.

Материал, который содержит влагу в количестве, превышающем равновесную влажность, называют *увлажненным*. С явлением увлажнения изоляции можно и нужно бороться. Максимальное количество связанной влаги, какое может содержать материал, обычно значительно выше максимальной гигроскопической влажности и определяется величиной влагопоглощения, зависящей от структуры оболочек материала (пор, капилляров) и от смачиваемости жидкостью его частиц (прилипания).

Чаще всего увлажнение материалов в изоляционных конструкциях ограждений, т. е. появление физико-механически связанной воды, начинается с конденсации внутри ограждения водяного пара, диффундирующего через ограждение под действием разности парциальных давлений. Конденсация пара происходит тогда, когда перегретый пар на пути движения встречает слои ограждения с температурой, при которой пар становится насыщенным. Возможность конденсации влаги в ограждении может быть выяснена расчетным путем. В расчете предполагается стационарность как потока теплоты, так и потока влаги. Для решения задачи сначала следует установить характер изменения температуры и парциального давления водяного пара внутри ограждения.

Таблица 3.4

Равновесная влажность некоторых материалов

Материал	Объемная масса в сухом состоянии $\rho_{об. м. с}$ кг/м <sup>3</sup>	Влажность материала при относительной влажности воздуха			
		$\phi = 50\%$		$\phi = 100\%$	
		массовая $x$ , %	объемная $w$ , %	массовая $x$ , %	объемная $w$ , %
<i>Неорганические материалы</i>					
Кирпич красный	1700	0,07	0,12	0,53	0,90
Стекланная вата	130	0,09	0,012	0,60	0,078
Минеральноватные плиты	350	0,30	0,11	1,90	0,67
Пенобетон	350	3,05	1,05	8,30	2,86
<i>Органические материалы</i>					
Дерево (сосна)	350	10,2	5,60	31,3	17,20
Пробковые плиты	200	5,2	1,04	14,1	2,82
Торфоплиты	225	10,9	2,43	28,4	6,40
Мипора	20	10,0	0,20	35,5	0,71

Как известно, температура в любом сечении  $x - x$  (рис. 3.1) находится из условия стационарности теплового потока

$$q = (t_n - t_{пм})/R_n = (t_n - t_x)/R_x \quad (3.1a)$$

где  $R_x$  — термическое сопротивление ограждения на пути теплового потока до сечения  $x - x$ .

Тогда

$$t_x = t_n - (R_x/R_n) * (t_n - t_{пм}) \quad (3.10)$$

Подобно этому условие стационарности потока влаги будет

$$w = (p_n - p_{пм})/H_n = (p_n - p_x)/H_x \quad (3.2a)$$

где  $H_x$  сопротивление паропроницанию ограждения на участке до сечения  $x - x$ .

Отсюда парциальное давление пара: в сечении  $x - x$

$$p_x = p_n - (H_x/H_n) * (p_n - p_x) \quad \text{или} \quad p_x = p_n - w H_x \quad (3.11)$$

Уравнение (3.11) показывает, что при прохождении водяного пара по ограждению его парциальное давление понижается от  $p_n$  до  $p_x$  в результате преодоления сопротивления ограждения паропроницанию. Если пренебречь величиной сопротивления влагоперехода от воздуха к поверхности ограждения, имея в виду его небольшую величину, то для однородной стенки уравнение может быть написано следующим образом:

$$p_x = p_n - (w/\mu)\delta_x \quad (3.11a)$$

Пренебрежение сопротивлением влагопереходу позволяет принимать парциальное давление пара на наружной поверхности ограждения равным давлению пара в воздухе, соприкасающемся с данной поверхностью, т. е.  $p_n$ .

Из последней зависимости можно заключить, что падение парциального давления пара в однородном ограждении происходит по линейному закону (прямая линия в координатах  $p - \delta$ ). Кроме того, видно, что падение давления происходит интенсивнее при прохождении потока большей величины и в материалах, обладающих меньшим коэффициентом паропроницаемости.

Знание температуры  $t_x$  в слое  $x - x$  и парциального давления пара  $p_x$  позволяет найти влажность воздуха и в этом слое  $\phi_x = p_x / p''_x$  и соответствующую равновесную влажность материала. Результаты расчета могут быть показаны на графиках  $t - \delta$  и  $p - \delta$ . Поскольку уравнение для  $t_x$  позволяет определить температуру в каждом слое ограждения, то по этим значениям температур

могут быть найдены и соответствующие давления насыщенного водяного пара  $p''_x$  в слоях ограждения. Так как изменение температуры по толщине однородного ограждения происходит по линейному закону, то изменение давления будет соответствовать логарифмическому закону связи между давлением и температурой насыщенного пара.

При построении такой диаграммы могут встретиться два случая. Первый случай изображен на рис. 3.4, а для однородного ограждения и на рис. 3.4, б — для неоднородного. Его особенность заключается в том, что линия парциального давления  $p_x$  проходит ниже линии  $p''_x$  и нигде с нею не пересекается. Это значит, что водяной пар в ограждении нигде не становится насыщенным и, следовательно, конденсации влаги в ограждении не происходит. В данном случае увлажнение изоляции не угрожает. Линия  $\varphi_x = f(\delta_x)$  протекает с наличием максимума там, где больше всего сближаются линии  $p_x$  и  $p''_x$ . Характерным является то, что максимум влажности воздуха и, следовательно, влажности (например, массовой —  $x$ ) материала оказывается вблизи от холодной поверхности ограждения, но не у самой холодной поверхности.

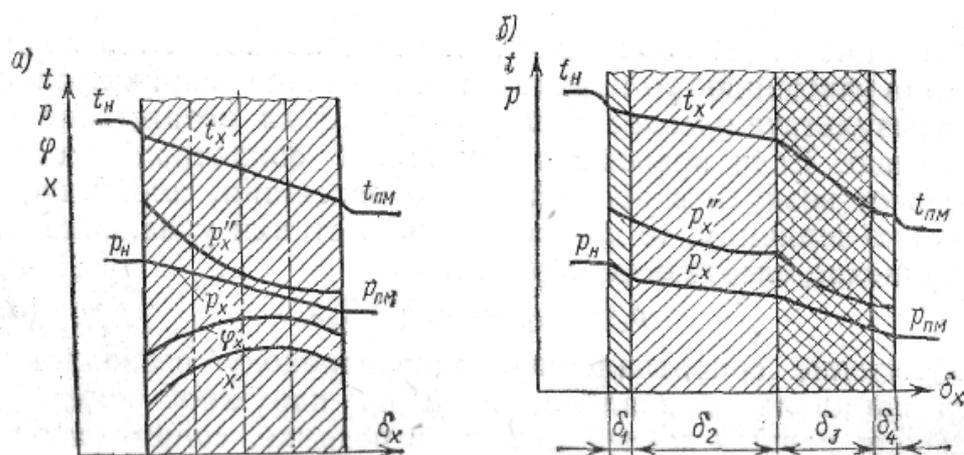


Рис. 3.4. Изменение температуры и упругости пара в ограждении

Такое же построение может быть выполнено и для неоднородного ограждения, состоящего из нескольких материалов с различным паропропусканием. В многослойном ограждении парциальное давление пара в различных слоях падает с неодинаковой скоростью, вследствие чего в плоскостях соприкосновения слоев различных материалов прямые  $p_x = f(\delta_x)$  получают переломы, образуя ломаную линию [см. и линию  $t_x = f(\delta_x)$ ].

Особенностью второго случая оказывается пересечение линий  $p_x$  и  $p''_x$  (рис. 3.5, а), т. е. на некоторых участках ограждения пар, диффундирующий через ограждение, становится насыщенным, что вызывает его частичную конденсацию внутри ограждения. Часть толщины ограждения, где происходит конденсация пара, называется *зоной конденсации*. Было бы неверно считать зоной конденсации участок  $a - b$  между точками пересечения линий  $p_x$  и  $p''_x$  прежде всего потому, что отрезок  $ab$  прямой  $de$  теперь неправильно характеризует давление пара. Дело в том, что не существует пара, который бы имел давление выше, чем давление насыщенного пара того же вещества при той же температуре. Это значит, что в зоне конденсации пар должен иметь давление, равное давлению насыщенного пара, т. е. изменять свое состояние по линии  $acb$ . Линия  $dacbe$  не может быть графиком изменения давления пара в однородном ограждении, так как в точках  $a$  и  $b$  появились резкие изменения линий (переломы), что характерно только для неоднородных (многослойных) ограждений. Поскольку плавный переход от прямой линии к кривой может быть осуществлен только по касательной, то действительным графиком падения давления пара в ограждении может быть линия  $afcge$ , которая состоит из отрезков касательных  $df$  и  $ge$ , проведенных из точек  $d$  и  $e$ , к линии  $p''_x = f(\delta_x)$ , и участка  $fcg$  самой линии  $p''_x = f(\delta_x)$  между точками касания  $fug$ . Последний участок ширины ограждения  $fcg$  и является действительной зоной конденсации. Графический метод нахождения зоны конденсации прост

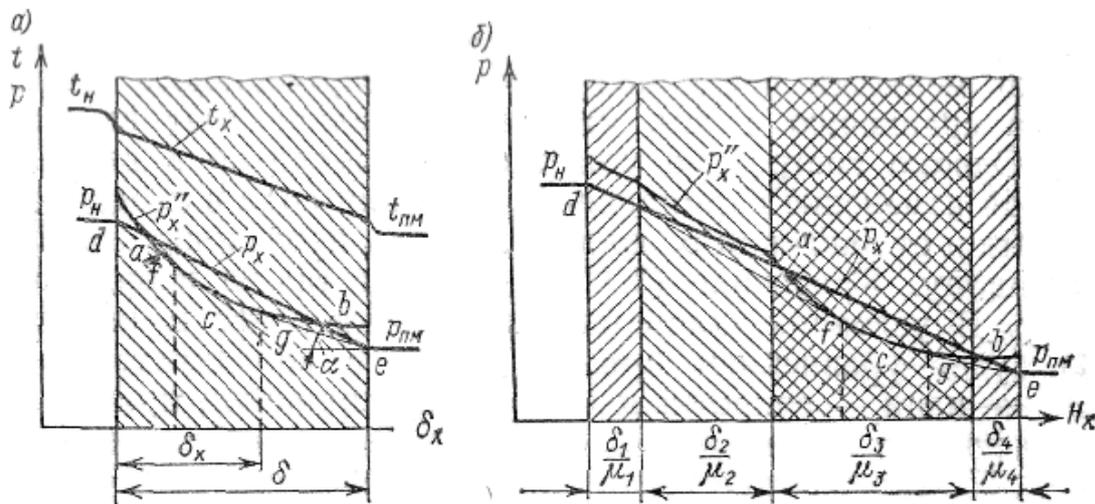


Рис. 3.5. Определение зоны конденсации

и нагляден, но может быть недостаточно точным. Более точно зону конденсации можно установить аналитическим методом. Так, для определения координат точки  $g$  — правой границы зоны конденсации — необходимо решить уравнение  $(p_g - p_{пм})/(\delta - \delta_x) = \operatorname{tg} \alpha$  или  $(p_g - p_{пм})/(\delta - \delta_x) = dp''_x/d\delta_x$  при  $\delta_x = \delta_g$ . Для его решения надо найти  $p''_x = f(\delta_x)$ , используя аналитические зависимости  $p''_x = f_1(t_x)$  и  $t_x = f_2(\delta_x)$ . В качестве первой из них целесообразно привлечь довольно точную зависимость давления водяного пара надо льдом (мбар), данную Ф. Леви в виде  $\lg p''_x = 11,35 \lg(t_x + 140) - 23,9591$  и справедливую в интервале от  $0^\circ$  до  $-40^\circ$  С. Так как для однородной стенки  $t_x = t_H - (\delta_x/\lambda) q$ , то искомая функция  $\lg p''_x = 11,35 \lg(t_H + 140 - (\delta_x/\lambda) q) - 23,9591$ . (3.12)

Решение уравнения (3.12) выполняется с помощью ЭВМ. Левая граница зоны конденсации - точка  $f$  — находится аналогично.

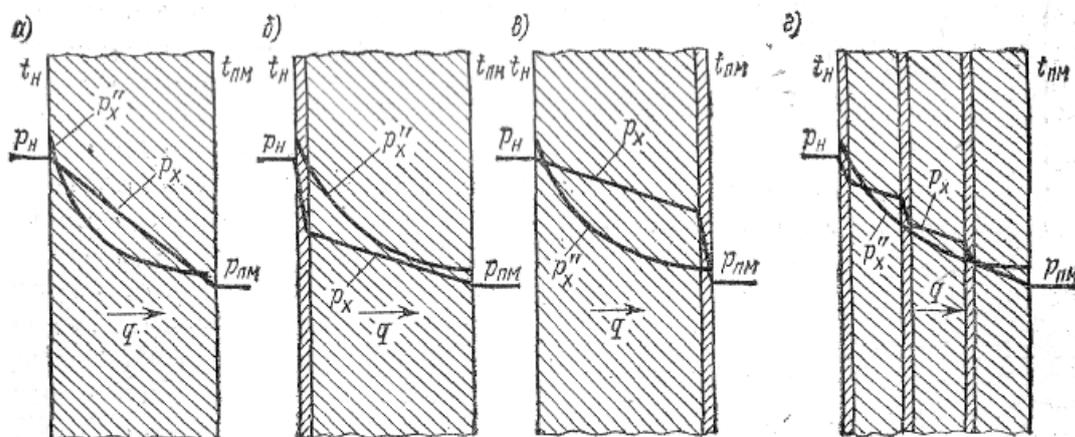
Можно определить, какое количество влаги остается (конденсируется) в ограждении. Рисунок показывает, что наличие зоны конденсации изменило характер линии  $p_x = f(\delta_x)$ . На участке касательной до зоны конденсации наклон ее больше наклона касательной после зоны конденсации. Из выражения (3.11а) следует, что в однородном ограждении разница в наклонах линии  $p_x = f(\delta_x)$  означает уменьшение потока влаги после зоны конденсации. Разница между потоками влаги до зоны конденсации и после нее определяет количество влаги (кг/с), которое конденсируется на  $1 \text{ м}^2$  поверхности ограждения. Можно обозначить это количество через  $\Delta w = w_1 - w_2$ . Тогда

$$\Delta w = ((p_H - p_f)/H_{df}) - ((p_g - p_{пм})/H_{ge}). \quad (3.13)$$

В многослойном (неоднородном) ограждении определение действительной зоны конденсации таким же путем не может быть осуществлено в координатах  $p - \delta$ , так как в этой диаграмме линия  $p_x = f(\delta_x)$  ломаная и, кроме того, при наличии зоны конденсации меняется численное значение парциального давления пара по сравнению с тем, что первоначально дает выражение (3.11). Однако построение может быть выполнено в диаграмме, в которой изменение парциального давления пара в неоднородном ограждении от давления  $p_H$  до давления  $p_{пм}$  происходит по линейному закону. Уравнение (3.11) указывает такую координатную систему. В условиях стационарного потока влаги  $w$  выражение (3.11) будет уравнением прямой линии в координатах  $p - H$  (давление пара — сопротивление паропропусканию), причем величина плотности потока  $w$  окажется угловым коэффициентом этой прямой. Построение такого графика показано на рис. 3.5, б.

Образовавшаяся зона конденсации оказывается очагом дальнейшего увлажнения материала ограждения. Появившаяся капельная влага начинает распространяться по капиллярам и порам материала ограждения, охватывая все более широкие слои ограждения. Хотя суточное количество поступающей влаги невелико, этот процесс может происходить почти непрерывно в течение многих лет эксплуатации холодильного сооружения. При выпадении достаточного количества влаги она переходит в гравитационную и под действием собственной силы тяжести начинает перемещаться в нижерасположенные слои ограждения.

Совершенно естественно, что борьба с образованием зоны конденсации должна вестись путем уменьшения потока влаги через ограждение, что достигается увеличением сопротивления ограждения паропрооницанию. Для этого в ограждении предусматривают пароизоляционный слой, представляющий значительное сопротивление паропрооницанию. Однако далеко небезразлично, где ставить этот парозащитный слой: до зоны конденсации или после нее, хотя в обоих случаях произойдет одинаковое уменьшение потока влаги. На рис. 3.6, а изображено ограждение, в котором имеется зона конденсации. Для ее устранения поставлен пароизоляционный слой с наружной стороны ограждения (рис: 3.6, б) или, как говорят, с его теплой стороны (со стороны более высокой температуры). В этом случае резкое падение парциального давления пара происходит до основного материала ограждения, благодаря чему линия  $p_x = f(\delta_x)$  в нем идет отлого и ниже линии  $p''_x = f(\delta_x)$ . Зона конденсации здесь не образуется. На рис. 3.6, в показано, что произойдет, если пароизоляция будет поставлена после ограждения — с холодной стороны. Тот же самый перепад  $\Delta p = p_n - p_{пм}$  одинаково распределится по тем же слоям ограждения, но изменение последовательности слоев привело к противоположному результату. Теперь малый наклон линии  $p_x = f(\delta_x)$  в материале ограждения сыграл отрицательную роль, вследствие чего зона конденсации не уменьшилась, а увеличилась. Слой материала с малым паропрооницанием создал как бы подпор для потока влаги, вследствие чего возникли условия для еще большего увлажнения материала ограждения.



**Рис. 3.6. Образование зоны конденсации при различном расположении пароизоляционного слоя**

Таким образом, можно утверждать, что пароизоляционный слой только тогда может привести к уменьшению или устранению зоны конденсации, когда он расположен перед слоем возможного образования зоны конденсации или с теплой стороны этого слоя.

При выполнении изоляционных конструкций из нескольких слоев однородного материала между слоями материала иногда создают паропрооницаемые слои из битума, применяемого для приклеивания плит теплоизоляционного материала к ограждению и друг к другу. Такого рода промежуточные паропрооницаемые слои только ухудшают положение, если в материале образуется зона конденсации (рис. 3.6, г). Здесь то же сопротивление паропрооницанию, что и в двух предыдущих случаях, разделено на три одинаковых, слоя, но увлажнение изоляции при этом не устраняется. Это указывает на то, что пароизоляционный слой должен не раздробляться, а весь сосредоточиваться с теплой стороны ограждения. Указанное обстоятельство заставляет также избегать подклеивания теплоизоляционных материалов сплошным слоем битума или битумной мастики, а осуществлять подклеивание отдельными точками или полосами (например, шириной 5 см через 15 см).

Из рис. 3.6 видно, что в многослойных ограждениях совершенно не безразличен порядок расположения слоев из разных материалов. Очевидно, что материалы в ограждении должны располагаться по ходу потока влаги и в порядке возрастания коэффициента паропрооницаемости. При обратной последовательности каждый последующий слой может оказаться

пароизоляционным слоем с холодной стороны для предыдущего слоя. Если при расчете изолированного ограждения выявлена зона конденсации, то необходимо определить сопротивление и толщину пароизоляционного слоя, необходимые для предупреждения конденсации водяного пара в ограждении. По рис. 3.5 можно установить, что зоны конденсации не будет, если плотность потока влаги через все ограждение будет уменьшена до величины  $w_a$  — плотности потока, проходящего после зоны конденсации на участке  $ge$ . Так как из выражения (3.13)  $w_2 = (p_g - p_{пм})/H_{ge}$  и этот поток должен проходить через все ограждение, то  $w_2 = (p_n - p_{пм})/H'_n$ , где  $H'_n$  - сопротивление ограждения паропрооницанию, при котором зоны конденсации не будет. Тогда

$$H'_n = (p_n - p_{пм})/w_2 = ((p_n - p_{пм})/(p_g - p_{пм}))/H_{ge} \quad (3.14)$$

Если сопротивление паропрооницанию ограждения, в котором выявлена зона конденсации, имеет величину  $H_n$ , то необходимое сопротивление пароизоляционного слоя  $H_{п}$  будет  $H_{п} = H'_n - H_n$

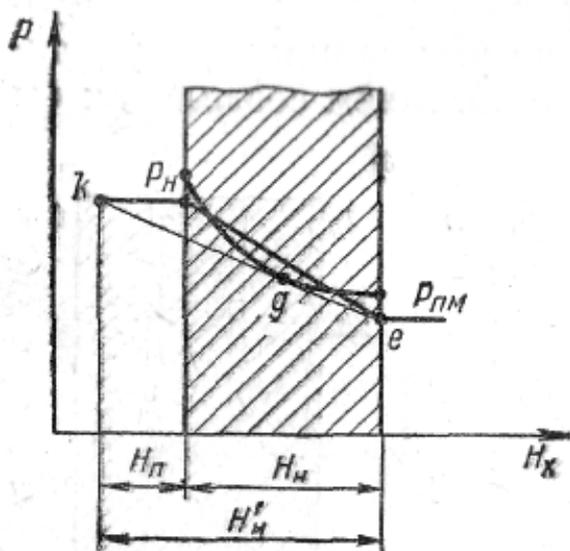


Рис. 3.7. Определение необходимого сопротивления пароизоляционного слоя

Толщина пароизоляционного слоя при коэффициенте паропрооницаемости выбранного материала  $\mu_{п}$  окажется равной  $\delta_{п} = \mu_{п} H_{п}$ . Величину  $H_{п}$  можно определить и графическим построением на диаграмме  $p - H$  (рис. 3.7). Для этого касательная  $ge$  должна быть продолжена влево до пересечения с линией постоянного давления  $p_n$  в точке  $k$ .

Иногда для полного устранения зоны конденсации требуется пароизоляционный слой довольно значительной толщины. Поэтому при определении необходимой толщины пароизоляционного слоя можно допускать некоторое накопление влаги в материале, которое за установленный срок эксплуатации изоляции (например, за 20 - 25 лет, после которых изоляцию надо заменить) вызовет определенное ухудшение характеристик теплоизоляционного материала. Исходя из того, что за этот срок может быть увеличен коэффициент теплопроводности материала в два раза, И. Ф. Душин (ВНИИХИ) предложил определять необходимое сопротивление паропрооницанию пароизоляционного слоя ( $m^2 \cdot ч \cdot мм. рт. ст./г$ ) по формуле  $H_{п} = 1,6 (p_n - p_{пм})$ . Учитывая кратковременность внешних условий, по которым ведется расчет, строительные нормы ФРГ допускают расчетное выпадение влаги в ограждении, определяемое по выражению (3.13), до  $0,15 \times 10^{-7} \text{ кг}/(m^2 \cdot с)$  и на основании этого рекомендуют определять толщину пароизоляционного слоя.

В действительных условиях работы холодильных сооружений рассмотренный вопрос существенно усложняется изменением температуры наружного воздуха от самых высоких для данной местности летних температур до самых низких зимних. В зимнее время возможны случаи (при температурах наружного воздуха ниже температуры в охлаждаемом помещении), когда поток влаги будет иметь обратное направление, т. е. из помещения наружу. Однако такое изменение направления потока влаги может иметь значение только для помещений с относительно высокими

температурами (выше  $+5^{\circ}\text{C}$ ) и в местностях с относительно низкими среднемесячными температурами наружного воздуха зимой. Для таких помещений, у которых обратный поток влаги в зимнее время достаточно заметен, необходимо, ставить пароизоляцию с обеих сторон теплоизоляции, т. е. с теплой и с холодной сторон, принимая все меры для того, чтобы теплоизоляционный материал укладывался в ограждение в сухом состоянии.

Хотя диффузионный поток водяного пара и является обычно главной причиной увлажнения, надо иметь в виду, что он не единственный возможный источник увлажнения. Теплоизоляционные материалы приходится охранять от непосредственного соприкосновения с проводниками капиллярной влаги: влажным грунтом, влажным земляным покровом на плоской крыше, увлажняемыми атмосферными осадками наружными стенами. Иногда увлажнение изоляционных материалов происходит от различного рода дефектов строительных конструкций, от протечек в кровлях, от неисправных водосточных желобов, от трещин в стенах и т. п. Все это вынуждает делать пароизоляцию с теплой стороны даже тогда, когда расчетом доказывается невозможность появления зоны конденсации. В таком случае предусматривается минимальный возможный слой паро- и гидрозащиты. Кроме случая, рассмотренного выше, пароизоляционный слой с холодной стороны следует предусматривать и в помещениях с большими влаговыведениями, приводящими к осадению или попаданию капельной влаги на ограждения.

Испытания изоляционных конструкций ограждений на действующих холодильниках, проведенные ВНИХИ и ЛТИХП, показали в ряде случаев значительное увлажнение теплоизоляционных материалов в ограждениях. Установлено, что пароизоляция, выполненная путем нанесения тонкого слоя битума, является недостаточной и часто паропроницаемой из-за плохого качества работ и наличия трещин.

### § 3. 5.

#### ПОНЯТИЕ О ТЕПЛОУСТОЙЧИВОСТИ ОГРАЖДЕНИЙ

Для упрощения расчетов предполагались постоянство теплового потока через ограждение и стационарность в нем температурного поля. В действительности, передача теплоты через ограждения охлаждаемых объектов осуществляется в нестационарных условиях, что прежде всего обусловлено периодическими изменениями температуры наружного воздуха и периодическим воздействием солнечной радиации им наружную поверхность ограждения. Так, в южных районах страны амплитуда суточных колебаний температуры наружного воздуха достигает 13 - 15 К, что вызывает соответственные изменения температуры наружной поверхности ограждения; амплитуда колебаний этой температуры может значительно возрастать из-за действия солнечного излучения на наружную поверхность ограждения.

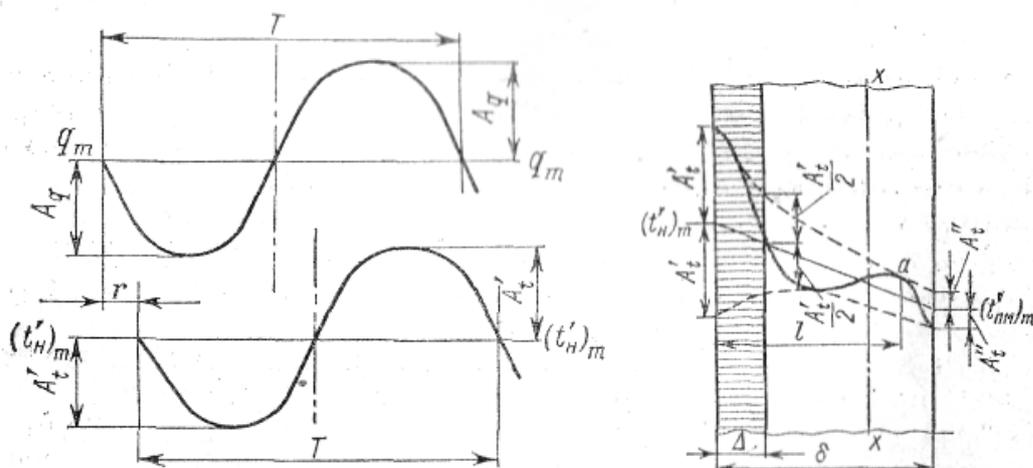


Рис. 3.8. Гармонические колебания теплового потока, проходящего через ограждение, и температуры наружной поверхности ограждения

В таких условиях ограждения охлаждаемых объектов должны обладать теплоустойчивостью. *Теплоустойчивость* есть свойство ограждения сохранять относительное постоянство температуры на внутренней поверхности при колебаниях плотности теплового потока. В холодильных сооружениях допустимые колебания температуры на внутренней поверхности пока не нормируются, но надо полагать, что они не должны быть больше допускаемых колебаний температуры внутри охлаждаемых помещений, т. е.  $\pm 0,5$  К. Следовательно, объективно возникающие колебания температуры наружной поверхности ограждения должны существенно затухать в ограждении, имеющем достаточную теплоустойчивость, чтобы не оказывать большого влияния на температуру, поддерживаемую внутри охлаждаемого объекта, и на состояние хранящихся или обрабатываемых продуктов.

Обычно рассмотрение свойства теплоустойчивости ограждений ведут, предполагая, что колебания температуры наружного воздуха являются простыми гармоническими колебаниями. Если происходит синусоидальное изменение наружной температуры  $t_n$  то плотность теплового потока  $q$  через ограждение будет изменяться также по синусоиде и с тем же периодом  $T$  часов (рис. 3.8). Средняя плотность теплового потока  $q_m = ((t_n)_m - t_{пм})$  где  $(t_n)_m$  — среднее значение наружной температуры за период времени  $T$ .

Поскольку амплитуда колебаний плотности теплового потока  $A_q$ , то изменение плотности теплового потока происходит от  $q_m - A_q$  до  $q_m + A_q$ . Изменение температуры наружной поверхности ограждения от среднего значения  $(t'_n)_m$  при амплитуде  $A'_t$  будет осуществляться с тем же периодом  $T$ , но запаздывать по времени на  $r$  часов.

Для однородной стенки (рис. 3.9) величина отклонения температуры  $t$  в любом сечении  $x$  ограждения от средней температуры  $t_{мх}$  в этом же сечении в момент времени  $\tau$  составляет для затухающих гармонических колебаний

$$\Theta_x = t_x - t_{мх} = A'_t \exp \left\{ -x [w/(2a)]^{0,5} \right\} \cos \{ \omega\tau - x [w/(2a)]^{0,5} \} \quad (3.15)$$

где  $w = 2\pi/T$  — частота колебаний;  $a$  — коэффициент температуропроводности материала ограждения.

Именно экспоненциальная функция в выражении (3.15) определяет величину амплитуды колебаний в любом сечении  $x$ . С увеличением  $x$  амплитуда колебаний быстро уменьшается; она меньше, если колебания осуществляются с большей частотой и если распространяются в материале с малой температуропроводностью.

Для наружной поверхности ограждения ( $x = 0$ ) уравнение (3.15) примет вид  $\Theta_{x=0} = t_n - ((t_n)_m) = A'_t \cos \omega\tau$ .

Плотность теплового потока, поступающего от поверхности ограждения внутрь ограждения в данный момент времени  $\tau$ ,

$$q_{x=0} = -\lambda (d\Theta/dx)_{x=0} = \lambda A'_t [w/(2a)]^{0,5} (\cos \omega\tau - \sin \omega\tau).$$

Так как по формуле косинуса суммы углов  $\cos [\omega\tau + (\pi/4)] = (\cos \omega\tau - \sin \omega\tau)/2^{0,5}$ , то

$$q_{x=0} = \lambda A'_t (w/a)^{0,5} \cos (\omega\tau + \pi/4) \text{ или} \\ q_{x=0} = A'_t (2\pi\lambda\rho_{об}/T)^{0,5} \cos (\omega\tau + \pi/4). \quad (3.16)$$

Выражение (3.16) подтверждает, что колебания плотности теплового потока происходят с тем же периодом  $T$ , но опережают по фазе колебания температуры поверхности ограждения на  $\pi/4$ . В этой формуле произведение  $A'_t (2\pi\lambda\rho_{об}/T)^{0,5}$  является амплитудой плотности теплового потока  $A_q$ . Ее отношение к амплитуде колебаний  $A'_t$  температуры поверхности, периодически воспринимающей этот тепловой поток, равно  $A_q/A'_t$ , называется *коэффициентом теплоусвоения поверхности ограждения* [Вт/(м<sup>2</sup>-К)], т. е.  $s = A_q/A'_t$  или  $s = (2\pi\lambda\rho_{об}/T)^{0,5}$ .

Коэффициент теплоусвоения представляет собой максимальное изменение плотности теплового потока, вызывающее колебания температуры на поверхности в 1 К. Для ограждения из однородного материала, при достаточной толщине стенки, теплоусвоение оказывается физической характеристикой стенки и оценивается *коэффициентом теплоусвоения материала*. Он также характеризует способность материала более или менее воспринимать теплоту при колебаниях температуры на его поверхности.

Если период колебаний  $T = 24$  ч, то коэффициент теплоусвоения обозначается  $s_{24}$  и равен  $s_{24} = 0,27 (\lambda\rho_{об})^{0,5}$ , если теплоемкость подставляется в кДж/(кг-К). Теплоизоляционные материалы, обладающие малыми  $\lambda$  и  $\rho_{об}$ , имеют и относительно малый коэффициент теплоусвоения (табл.3.5).

Таблица 3.5

## Коэффициенты теплоусвоения некоторых материалов

Материал	$\lambda$ , Вт/(м*К)	$\rho_{об}$ , кг/м <sup>3</sup>	$s_{24}$ , Вт/(м <sup>2</sup> К)
Сталь	45,400	7850	109,30
Мрамор	2,900	2800	26,40
Бетон	1,190	2400	15,35
Дерево	0,107	450	3,02
Минеральноватные плиты	0,093	400	1,43
Пенополистирол	0,047	30	0,34
Пенополиуретан	0,019	15	0,22

Различной величиной коэффициента теплоусвоения объясняется, например, тот факт, что предметы из разных материалов с резко отличным теплоусвоением, находящиеся в одном помещении, т. е. имеющие одинаковую температуру, при прикосновении к ним кажутся — одни теплыми, а другие — холодными. Теплоизоляционные материалы высокой эффективности обладают весьма низкими коэффициентами теплоусвоения, т. е. при изменении температуры поверхности отдают меньшее количество теплоты и поэтому должны применяться для изоляции сооружений с резко переменным режимом работы (испытательные камеры, регенераторы и т. п.). В результате затухания колебаний температуры в толще ограждения (рис. 3.9) на внутренней поверхности при средней температуре поверхности  $t'_{нм}$  колебания имеют значительно меньшую амплитуду  $A'_t$ . Штриховые линии по обеим сторонам прямой линии падения температуры при стационарном режиме представляют собой геометрические места точек, характеризующих максимальные и минимальные значения температур в соответствующих плоскостях ограждения, изменяющиеся в интервале  $t_x \pm (A_t)_x$ .

Отношение амплитуды  $A'_t$  на поверхности ограждения, воспринимающей колебания температуры внешней среды, к амплитуде  $A''_t$  на внутренней поверхности называется *затуханием амплитуд*  $v$  внутри ограждения толщиной  $\delta$ , т. е.  $v = A'_t/A''_t$ . Из зависимости (3.15) амплитуда колебаний температуры внутренней поверхности  $A''_t = A'( \exp [ -\delta(w/2a)^{0,5} ] )$ . Тогда  $v = \exp [ \delta (w/2a)^{0,5} ]$ . Если показатель степени в последнем выражении умножить и разделить на  $K$ , то можно получить  $v = \exp [ (\delta/\lambda)(2\pi\lambda c\rho_{об}/T)^{0,5}/2^{0,5} ]$ , или  $v = \exp(Rs/2^{0,5})$ . (3.17)

Теперь в показатель степени входит произведение термического сопротивления слоя материала на коэффициент теплоусвоения этого материала. Эту безразмерную величину  $D = Rs$  называют *характеристикой тепловой инерции* (массивности) *ограждения*, выполненного из данного материала. Как видно из выражения (3.17), она является мерой интенсивности затухания колебаний температуры внутри однородного ограждения.

Поскольку  $\exp(1/2)^{0,5} = 2$ , то выражение (3.17) примет вид  $v = 2^{Rs} = 2^D$ . Из него следует, что при  $D = 1$  затухание колебаний  $v = 2$ . Массивностью  $D = 1$  характеризуется так называемый слой резких колебаний температуры — слой, непосредственно прилегающий к поверхности, воспринимающей периодически поступающую теплоту. При прохождении через него тепловой волны амплитуда колебаний температуры уменьшается в два раза. Действительная толщина  $\Delta$  слоя резких колебаний может быть найдена по соотношению  $(\Delta/\lambda)s = 1$ , из которого  $\Delta = \lambda/s$ . Например, для стали  $\Delta = 45,4/109,3 = 0,415$  м, а для пенополиуретана  $\Delta = 0,019/0,22 = 0,086$  м.

Помимо того, что колебания температуры в ограждении затухают по мере удаления от наружной поверхности, они еще и запаздывают по времени. Это показано на рисунке толстой волнообразной линией, характеризующей температуру в любой плоскости ограждения в момент времени, соответствующий максимальной температуре на наружной поверхности  $(t'_{н})_m + A'_t$ . В точке  $a$  колебания температуры отстают от колебаний температуры на наружной поверхности на время, равное периоду колебаний, т. е. на  $T$  часов. Расстояние  $l$  представляет собой длину волны. Число волн, располагающихся в толще ограждения, зависит от показателя  $D$  тепловой инерционности ограждения. В ограждении, имеющем  $D = 8,5$ , располагается одна температурная волна, т. е. колебания температуры наружной поверхности, произошедшие сегодня, при  $T = 24$  ч придут на внутреннюю поверхность завтра в то же время;  $D < 8,5$  соответствует неполная температурная

волна в ограждении, а  $D > 8,5$  — более одной температурной волны. Для многослойного ограждения его массивность определяется как сумма массивностей отдельных слоев, т. е.

$$D = R_1s_1 + R_2s_2 + R_3s_3 + \dots, \quad (3.18)$$

хотя это и неточно, поскольку выражение (3.18) не учитывает затухания тепловой волны при переходе из одного материала в другой. Ограждение считается легким, если  $D < 4$ , средним — при  $D = 4-7$  и массивным — при  $D > 7$ .

### § 3.6.

#### ИЗОЛЯЦИОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ ОГРАЖДЕНИЙ

Об изоляции холодильных сооружений иногда говорят, что нет плохих изоляционных материалов, а есть плохие изоляционные конструкции. В определенной степени это справедливо. На самом деле, имеются примеры плохого состояния изоляции, выполненной из хороших материалов, и в то же время известны случаи многолетней эксплуатации без нарушения качества далеко небезупречных изоляционных материалов. В связи с этим весьма важно установить, каким требованиям должна удовлетворять хорошая изоляционная конструкция.

1. Изоляционная конструкция должна быть экономичной. Это не значит быть просто дешевой, хотя последнее и имеет большое значение из-за высокой доли стоимости изоляции в сумме общих затрат на холодильное сооружение. Через наружные ограждения в охлаждаемые помещения во многих случаях поступает не менее половины всех теплопритоков. Уменьшить проникновение теплоты через ограждение можно, как известно, увеличением толщины слоя теплоизоляционного материала. Однако неразумно увеличивать ее беспредельно. При некоторой толщине ограждения или, что то же, при некотором коэффициенте теплопередачи приведенные затраты на ограждение окажутся минимальными, что позволяет найти значение оптимального коэффициента теплопередачи, соответствующего этому минимуму.

Если обозначить через  $Z_{пр}$  сумму приведенных годовых затрат в руб., отнесенных к  $1 \text{ м}^3$  изолированного ограждения, то она будет равна

$$Z_{пр} = S + E_n K, \quad (3.19)$$

где  $S$  - годовые эксплуатационные затраты;  $K$  — капитальные затраты на изоляционную конструкцию;  $E_n$  — нормативный коэффициент эффективности капитальных затрат.

Эксплуатационные затраты, связанные с теплоизоляционными конструкциями,  $S = A + E + U$ , где  $A$  - амортизационные отчисления от стоимости изоляции;  $E$  - энергетические затраты на покрытие теплопритоков через изоляцию;  $U$  — стоимость продуктов, потерянных из-за усушки, вызванной проникновением теплоты через изолированное ограждение. Все члены зависимости (3.19) являются функцией от толщины теплоизоляционного слоя  $\delta_{из}$  или от коэффициента теплопередачи ограждения  $k_n$ . Причем члены, связанные с капитальными затратами ( $A + E_n K$ ), возрастают с увеличением  $\delta_{из}$  (или с уменьшением  $k_n$ ), а затраты энергии и потери от усушки имеют противоположную тенденцию.

.Оптимальная толщина изоляции, соответствующая минимальным приведенным затратам, может быть найдена, если приравнять нулю производную  $Z_{пр}$  по  $\delta_{из}$ , т. е.  $dZ_{пр}/d\delta_{из} = 0$ , что дает возможность найти  $(\delta_{из})_{опт}$  или  $k_{n, опт}$ . Определение  $k_{n, опт}$  может быть проведено и графически, как это показано на рис. 3.10. Нужно сказать, что кривая  $Z_{пр} = f(k_n)$  имеет довольно пологий (расплывчатый) минимум, вследствие чего существенные отклонения от  $k_{n, опт}$  (на 20—30%) приводят к отклонению от  $Z_{пр, мин}$  не более чем на 5—10%. СНиП 105—74 установлены нормативные значения  $k_n$  для наружных стен охлаждаемых помещений (табл. 3.6), несколько большие, чем оптимальные.

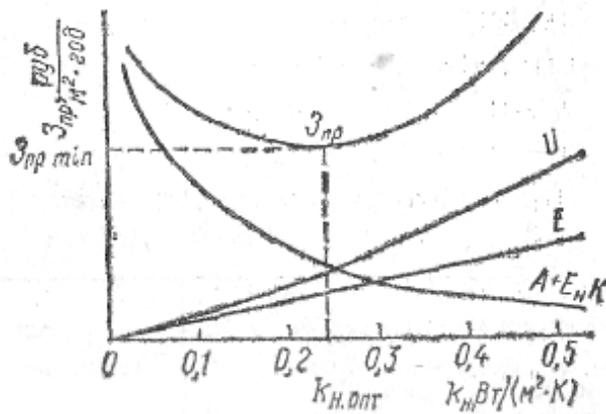


Рис. 3.10. Графическое определение оптимального коэффициента теплопередачи изолированного ограждения

Таблица 3.6 Коэффициенты теплопередачи наружных ограждений

Средняя годовая температура в районе строительства, °С	Коэффициент теплопередачи $k_n$ [Вт/м <sup>2</sup> К] при температуре в охлаждаемом помещении, °С					
	—30	— 20	-10	- 4	4	12
0 и ниже	0,210	0,255	0,325	0,465	0,580	0,700
Выше 0, ниже 9	0,200	0,235	0,280	0,350	0,510	0,640
9 и выше	0,185	0,210	0,235	0,280	0,350	0,525

Для помещений с различной температурой надо

создавать ограждения с одинаково экономичной изоляцией. Это может быть обеспечено тогда, когда через каждое наружное ограждение независимо от температуры внутри помещения будет проходить тепловой поток с одинаковой плотностью. Для камер холодильников данным, приведенным в табл. 3.6, соответствует оптимальная плотность теплового потока 10—12 Вт/м<sup>2</sup>. Для транспортных и мелких установок это значение может быть повышено до 16—18 Вт/м<sup>2</sup>. При низких температурах (до —100° С) численное значение оптимального теплового потока повышается, достигая для небольших установок 20 Вт/м<sup>2</sup>.

Коэффициенты теплопередачи покрытий охлаждаемых помещений с отрицательными температурами принимаются меньше, чем наружных стен, на 7—10%, а для помещений с положительными температурами - на 15 - 25%, учитывая заметное увеличение теплового потока от действия солнечной радиации.

Значения коэффициентов теплопередачи обогреваемых полов, лежащих на грунте, принимаются по табл. 3.7.

2. Изоляционная конструкция ограждения должна обеспечить необходимый перепад между температурой поверхности и температурой окружающего воздуха. Этот температурный перепад определяется или технологическими требованиями, или необходимостью воспрепятствовать конденсации влаги на поверхности ограждения.

Для стационарного теплового потока, если задана разность температур в охлаждаемом помещении  $t'_{пм} - t_{пм}$  (рис. 3.2), коэффициент теплопередачи ограждения из зависимостей (3.1) и (3.3) равен

$$k = \alpha_{пм}(t'_{пм} - t_{пм}) / (t_n - t_{пм}) \quad (3.20)$$

**Таблица 3.7 Коэффициент теплопередачи обогреваемых полов**

Температура воздуха в помещении, °С	Коэффициент теплопередачи $k_p$ , Вт/(м <sup>2</sup> К)
От 4 до — 4	0,405
—10	0,290
От —20 до —30	0,210

В действительности, тепловой поток нестационарен из-за колебаний температуры  $t_n$ , что будет вызывать, в свою очередь, колебания температуры поверхностей  $t'_n$  и  $t'_{пм}$  - Амплитуда колебаний этих температур зависит от массивности ограждений. Для учета нестационарности режима в уравнение (3.20) вводится множитель  $1/m$ , характеризующий массивность ограждений. Тогда уравнение для коэффициента теплопередачи примет окончательный вид

$$k = \alpha_{пм} (t'_{пм} - t_{пм}) / (t_n - t_{пм}) m]. \quad (3.20a)$$

Для массивных ограждений  $m = 1,00$ ; для ограждений средней массивности  $m = 1,10$ ; для легких ограждений  $m = 1,15$ .

Чтобы не допустить конденсацию пара из воздуха на поверхности ограждения, разделяющего два помещения с температурами  $t_1$  и  $t_2$  (пусть  $t_1 > t_2$ ), нужно, чтобы температура поверхности  $t'_1$  была выше температуры точки росы  $t_{р1}$  воздуха в помещении 1 при его влажности  $\phi_1$  т. е.

$$t'_1 > t_{р1} \quad (3.21)$$

Тогда  $k = \alpha_1 (t_1 - t'_1) / (t_1 - t_2) m$  или  $k < \alpha_1 (t_1 - t_{р1}) / (t_1 - t_2) m$ . С учетом коэффициента запаса, обеспечивающего выполнение неравенства (3.21), коэффициент теплопередачи ограждения

$$k = 0,95 \alpha_1 (t_1 - t_{р1}) / (t_1 - t_2) m \quad (3.22)$$

По условию недопущения конденсации пара на поверхности, обращенной в теплое помещение, должен определяться коэффициент теплопередачи внутренних помещений (перегородок, междуэтажных перекрытий). Нормативные значения коэффициентов теплопередачи внутренних ограждений приведены в табл. 3.8.

На недопущение конденсации влаги па поверхности стены со стороны камеры приходится проверять в некоторых случаях и наружные ограждения камер с отрицательными температурами при летних расчетных условиях и камер с положительными температурами при зимних расчетных условиях. При расчете коэффициента теплопередачи принимаются значения коэффициентов теплоотдачи  $\alpha_{пм}$ , равные 6—7 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

**Таблица 3.8 Коэффициент теплопередачи внутренних ограждений**

Температура воздуха в более теплом помещении, °С	Коэффициент теплопередачи Вт/(м <sup>2</sup> К) при температуре воздуха в более холодном помещении, °С					
	-30	— 20	-10	-4	4	12
-30	0,580	-	-	-	-	-
-20	0,500	0,580	-	-	-	-
-10	0,370	0,405	0,580	-	-	-
-4	0,280	0,325	0,405	0,580	-	-
4	0,245	0,255	0,300	0,465	0,580	-
12	0,210	0,220	0,255	0,405	0,525	0,755
18	0,200	0,210	0,230	0,350	0,465	0,700

По вычисленному или принятому коэффициенту теплопередачи может быть определена толщина слоя теплоизоляционного материала. Если ограждение представляет собой многослойную стену, то

$$k = 1 / (1 / \alpha_n + \sum (\delta_i / \lambda_i) + (\delta_{из} / \lambda_{из}) + 1 / \alpha_{пм}). \quad (3.23)$$

где,  $\Sigma(\delta_i/\lambda_i)$  — сумма термических сопротивлений всех слоев ограждения, кроме слоя теплоизоляционного материала;  $\delta_{из}$  и  $\lambda_{из}$  — толщина слоя и коэффициент теплопроводности теплоизоляционного материала в конструкции ограждения.

Из формулы (3.23) находится выражение для определения толщины слоя  $\delta_{из}$  (м) теплоизоляционного материала

$$\delta_{из} = \lambda_{из} (1/k - (1/\alpha_n + \Sigma(\delta_i/\lambda_i) + 1/\alpha_{пм})) \quad (3.24)$$

Действительная толщина теплоизоляционного слоя при применении штучных материалов получается округлением найденного размера до величины, кратной стандартной толщине выпускаемых изделий. Теплоизоляцию следует выполнять по меньшей мере из двух слоев плит или блоков для того, чтобы при производстве теплоизоляционных работ можно было перекрывать швы (стыки) первого слоя материала плитами или блоками второго слоя.

Условием недопущения конденсации пара из воздуха на наружной поверхности должна отвечать также изоляция аппаратов и холодных трубопроводов. Во избежание образования влаги на поверхности трубопроводов (рис. 3.11) должно осуществляться неравенство (3.21).

Если пренебречь термическим сопротивлением теплоотдачи от внутренней поверхности трубы и термическим сопротивлением стенки трубы, то можно написать выражение плотности теплового потока  $q'$  через изолированную трубу (Вт) на 1 м ее длины в случае стационарного режима

$$(3.25) \quad q' = \pi(t_1 - t_a) / \{1/(\alpha_1 D_{из}) + [1/(2\lambda_{из})] \ln(D_{из}/d_{из})\} = \pi(t_1 - t'_1) / [1/(\alpha_1 D_{из})]$$

Равенство (3.25) может быть написано в виде

$$(t_1 - t'_1) / (t_1 - t_a) = 1 / \{1 + [\alpha_1 D_{из} / (2\lambda_{из})] \ln(D_{из}/d_{из})\}$$

Для выполнения неравенства (3.21) должно быть:

$$(3.26) \quad (t_1 - t_{p1}) / (t_1 - t_a) > 1 / \{1 + [\alpha_1 D_{из} / (2\lambda_{из})] \ln(D_{из}/d_{из})\};$$

$$0,95(t_1 - t_{p1}) / (t_1 - t_a) = 1 / \{1 + [\alpha_1 D_{из} / (2\lambda_{из})] \ln(D_{из}/d_{из})\}$$

Искомая величина  $\delta_{из} = (D_{из} - d_{из})/2$  находится из уравнения (3.26), которое проще всего решать методом последовательного приближения, задаваясь значениями  $D_{из}$ , или же вычислением на ЭВМ. Как известно, отношение  $2\lambda_{из} / \alpha_1$  представляет собой критический диаметр изоляции  $D_{кр}$ , при котором тепловой поток через изоляцию трубопровода достигает максимального значения  $q'_{max}$  (рис. 3.12). В связи с этим зависимость (3.26) примет вид

$$(3.26a) \quad 0,95 (t_1 - t_{p1}) / (t_1 - t_a) = 1 / [1 + (D_{из}/D_{кр}) \ln(D_{из}/d_{из})]$$

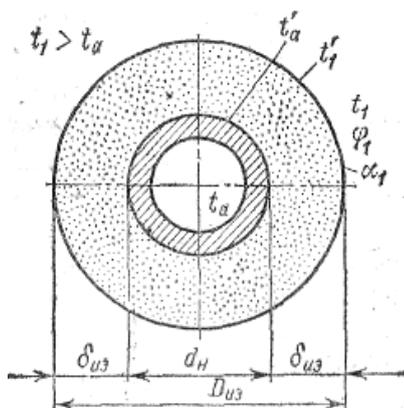


Рис. 3.11 Теплоизоляция холодного трубопровода

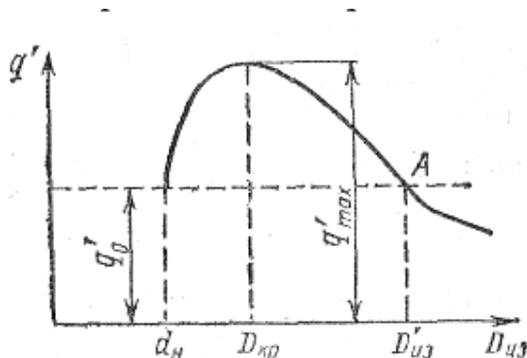
При решении уравнения (3.26) необходимо выбирать  $D_{из} > D_{кр}$ , что заставляет применять для изоляции холодных трубопроводов эффективные и высокоэффективные материалы с малым значением  $\lambda_{из}$ , чтобы уменьшить величину  $D_{кр}$ . Особенно важно уменьшение  $D_{кр}$  для изоляции трубопроводов диаметром менее 50 мм. Требуется также, чтобы тепловая изоляция холодных трубопроводов выполняла и второе свое назначение: уменьшала теплоприток через стенку трубы. Из рис. 3.12 видно, что эта функция выполняется только при  $D_{из} > D'_{из}$ , так как только тогда плотность теплового потока  $q'$  через изоляцию станет меньше плотности теплового потока  $q'_0$  через стенку неизолированной трубы. Точке А соответствует равенство  $q' = q'_0$  или

$$\pi(t_1 - t_a) / \{1/(\alpha_1 D'_{из}) + [1/(2\lambda_{из})] \ln (D'_{из}/d_H)\} = \pi(t_1 - t_a) / [1/(\alpha_1 d_H)],$$

откуда  $1/(\alpha_1 D'_{из}) + [1/(2\lambda_{из})] \ln (D'_{из}/d_H) = 1/(\alpha_1 d_H)$ . Полученное выражение легко приводится к виду

$$(3.27) \quad 1 + (D'_{из}/D_{кр}) \ln (D'_{из}/d_H) = D'_{из}/d_H$$

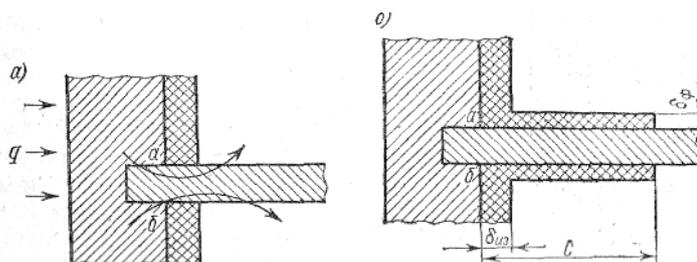
Решение этого уравнения дает возможность найти толщину изоляционного слоя, при которой теплоприток через изоляцию оказывается одинаковым с теплопритоком через неизолированную трубу. Очевидно, что уменьшение теплопритока по сравнению с неизолированной трубой возможно лишь при соблюдении неравенства



$$(3.27a) \quad [1 + (D_{из}/D_{кр}) \ln (D_{из}/d_H)] > D_{из}/d_H$$

**Рис. 3.12 Зависимость плотности теплового потока через изоляцию трубопровода от толщины теплоизоляционного слоя**

3. Изоляционная конструкция должна обеспечить непрерывность как теплоизоляционного, так и пароизоляционного слоев по всей поверхности охлаждаемого сооружения. При наличии одиночного охлаждаемого помещения это условие легко выполняется путем укладки изоляции по внутренней поверхности ограждений. Чтобы обеспечить непрерывность изоляции при большом количестве охлаждаемых помещений и в многоэтажных сооружениях, приходится прибегать к специальным строительным конструкциям.



**Рис. 3.13 Нарушение непрерывности изоляционного слоя в обычных строительных конструкциях многоэтажных зданий**

При обычных строительных конструкциях промышленных многоэтажных зданий непрерывность изоляционного слоя будет нарушаться междуэтажными перекрытиями (рис. 3.13, а) и внутренними стенами. В этом случае в изолированном ограждении образуются места с меньшим термическим сопротивлением слоя теплоизоляционного материала. Такие места называются тепловыми мостиками. В тепловых мостиках происходит концентрация плотности потока, вследствие чего в этих местах теплопритоки увеличиваются непропорционально площади мостиков. Но значительно больший вред приносят тепловые мостики тем, что они являются очагами увлажнения изоляционной конструкции. На самом деле, в плоскости *ab* междуэтажного перекрытия температура гораздо ниже, чем на теплой поверхности теплоизоляционного слоя, что может вызвать здесь конденсацию пара и дальнейшее продвижение влаги по материалу под действием капиллярных, а затем и гравитационных сил.

Можно воспрепятствовать вредному влиянию тепловых мостиков путем выполнения возле них изолированных панелей или так называемых фартуков (в судостроении именуемых риббандами), показанных на рис. 3.13, б. Для определения длины фартука *C*, достаточной для устранения вредных последствий от наличия теплового мостика, в первом приближении можно считать, что сопротивление передаче теплоты вдоль мостика, покрытого фартуком, должно равняться термическому сопротивлению основного теплоизоляционного слоя, т. е.  $\delta_{из}/\lambda_{из} = C/\lambda_m$ , откуда

$$(3.28) \quad C = \delta_{из} \lambda_m / \lambda_{из}$$

где  $\lambda_m$  - коэффициент теплопроводности материала теплового мостика.

Так как коэффициент теплопроводности строительных материалов значительно больше коэффициента теплопроводности изоляционных материалов, то длина фартука оказывается равной 1,0-1,5м. Толщина изоляционного слоя фартука  $\delta_f$  берется обычно  $1/2\delta_{из}$ . Устройство фартука влечет за собой повышенный расход теплоизоляционных материалов, появление уступа на полу помещения и уменьшение полезного объема помещения. По этим причинам оно может выполняться лишь при невозможности осуществления более рациональных конструкций.

При строительстве многоэтажных холодильников для создания непрерывного изоляционного слоя применяются специальные строительные конструкции, называемые этажерочными. Такая конструкция представляет собой монолитную или сборную железобетонную этажерку, у которой колонны выполняют функцию стоек, а междуэтажные перекрытия - полки. Вся нагрузка от уложенных грузов передается через перекрытия на колонны. В такой конструкции наружные стены испытывают нагрузку только от собственной массы, т. е. являются самонесущими и защищают изоляционный слой от механических повреждений и атмосферных осадков.

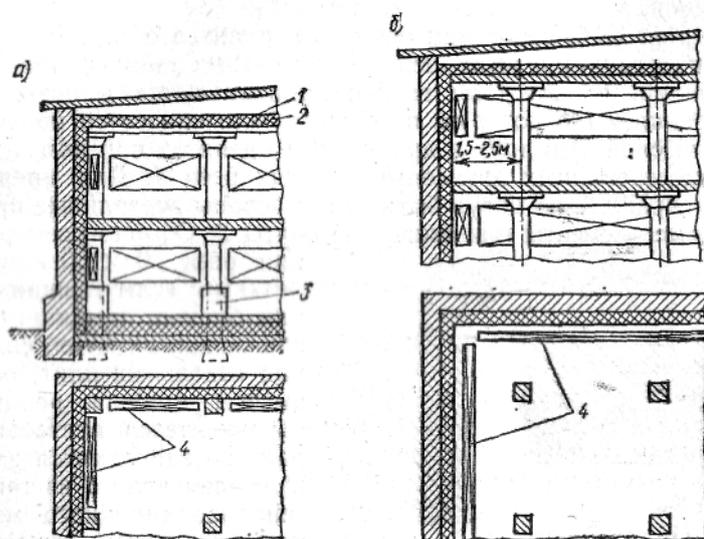
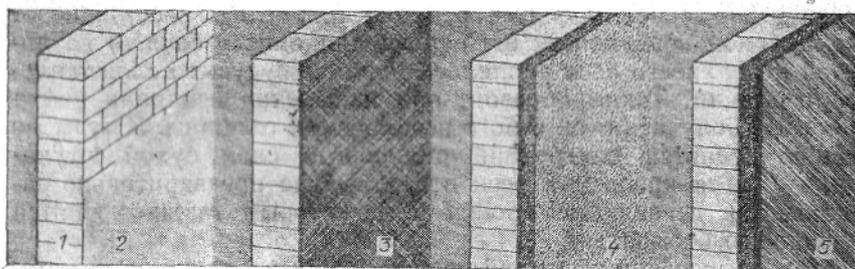


Рис. 3.14 Создание непрерывного изоляционного слоя в этажерочных конструкциях многоэтажных зданий

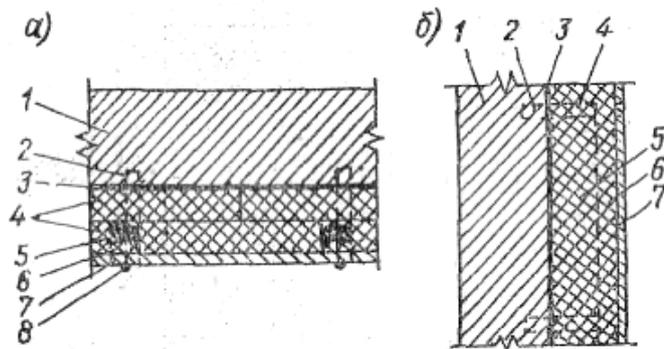
Этажерочные конструкции применяются в двух основных вариантах: с пристенными колоннами (рис. 3.14, а) и с консольными перекрытиями (рис. 3.14, б). Обе конструкции позволяют создать непрерывный слой теплоизоляции 2 и пароизоляции 1. Как видно, непрерывность изоляционного слоя в этих случаях нарушается только по колоннам. Поэтому, когда колонны проходят через слой тепловой изоляции, их приходится изолировать (снизу или сверху - в зависимости от того, где проходит теплоизоляционный слой) фартуками 3 (рис. 3.14, а). Не вдаваясь в оценку этих конструкций с точки зрения строительной техники, можно отметить достоинства варианта с консольными перекрытиями, заключающиеся в том, что облегчается выполнение изоляционного слоя (отсутствуют трудности с укладкой изоляции за колоннами), а также наблюдение за состоянием изоляции и ее ремонт; упрощается изготовление и монтаж охлаждающих приборов 4.

В наиболее распространенных изоляционных конструкциях при применении штучных теплоизоляционных материалов (рис. 3.15) теплоизоляционный слой 4 защищается наружной стеной 1, выполняемой из кирпича (или железобетона, бетонных камней, естественных камней и т. п.). Выравнивающий слой штукатурки 2 накладывается на стену для сглаживания неровностей внутренней поверхности кладки, так как наносить битумный слой и наклеивать пароизоляционные материалы (слой 3) следует только на ровную поверхность. Со стороны охлаждаемого: помещения слой тепловой изоляции покрывается штукатуркой 5. Изоляционная конструкция должна быть достаточно надежной и прочной.



**Рис. 3.15 Стена, изолированная штучными теплоизоляционными материалами**

На рис. 3.16, а показан один из вариантов обеспечения, прочности конструкции, выполненной из плитных теплоизоляционных материалов. Плиты 4 не только приклеиваются к поверхности ограждения / (на которую предварительно наносится пароизоляционный слой 3) и друг к другу, но и крепятся при помощи каркаса из деревянных антисептированных реек 5. Для крепления реек к ограждению могут быть использованы деревянные пробки, закладные элементы или анкерные болты 2. Обычно размер сечения реек 50 X 50 или 50 X 60 мм; если толщина плит или блоков, предварительно, образованных путем склеивания отдельных плит, больше высоты сечения рейки, то образующееся пустое пространство заполняется закладным элементом 6 из того же теплоизоляционного материала. К рейкам же при помощи гвоздей или шурупов 8 крепятся листы 7 сухой штукатурки (например, асбестоцементной), образующие, внутренний отделочный слой.



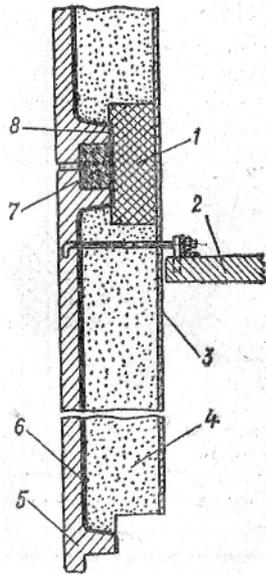
**Рис. 3.16 Крепление теплоизоляционного материала к ограждению**  
**а – теплоизоляция из плитных материалов**  
**б - теплоизоляция из напыляемых материалов**

Если теплоизоляционный слой 5 (рис. 3.16, б) наносится на поверхность ограждения 1 путем напыления, то до напыления перед ограждением крепятся рейки 6 так, чтобы расстояние от изолируемой поверхности (от пароизоляционного слоя 3) до лицевой поверхности реек равнялось толщине будущего слоя тепловой изоляции. Таким образом, при напылении изоляции рейки помогают получить слой строго необходимой толщины. К этим же рейкам крепится внутренний отделочный слой сухой штукатурки 7. Для крепления реек в ограждение предварительно заделываются деревянные пробки 2, к которым также крепятся деревянные бобышки 4.

При применении засыпной изоляции или изоляционного материала, вспенивающегося в конструкции, с внутренней стороны ограждения выполняют вторую стенку (которая должна быть достаточно паропроницаемой) и между этими двумя стенками засыпают изоляционный материал или заливают исходную композицию. Для изоляции временных сооружений или небольших установок можно применять также засыпной изоляционный материал, укладывая его между двумя деревянными обшивками из двух рядов досок; между последними с теплой стороны (или с обеих сторон) укладывают пароизоляционный слой.

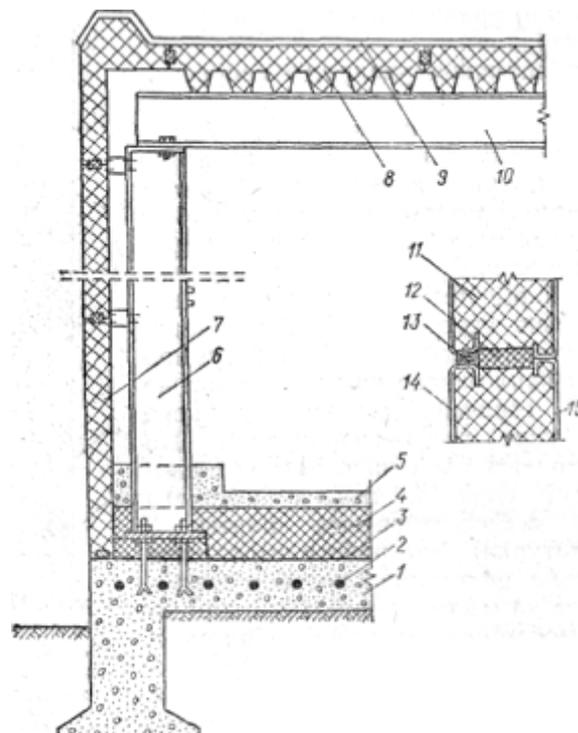
В случае применения достаточно прочных изоляционных материалов, таких, как пенобетон, пеностекло, арктический туф и др., материал ограждения иногда является и несущим, и теплоизоляционным. Так были выполнены ограждения, например, нескольких холодильников при мясокомбинатах, но без пароизоляционного слоя, что в ряде случаев (особенно при использовании пенобетона для изоляции низкотемпературных помещений) приводило к сильному увлажнению материала.

Большое внимание уделяется непрерывности изоляционного слоя при постройке холодильников из сборных элементов. Место стыка двух вертикальных панелей показано на рис. 3.17. Сборные панели для стен отечественных предприятий выполняют в виде железобетонных плит 5 в форме корыт шириной 2000 мм и длиной, соответствующей унифицированной высоте этажа холодильника. На внутреннюю поверхность панелей наносят пароизоляционный слой 6 из битумной грунтовки и наклеенного на нее с помощью битума или горячей мастики рулонного материала (чаще всего гидроизола). На пароизоляционный слой наливается теплоизоляционный слой 4, поверх которого укладывают асбестоцементные плиты 3 (сухая штукатурка). Эту работу выполняют предварительно на специально оборудованной площадке на месте строительства или на заводе железобетонных изделий. При монтаже панели крепят к перекрытию 2, а прямоугольник 7, образованный выступающими ребрами плиты панели, заливают бетоном. На место стыка наносят пароизоляционный слой 8 и по нему укладывают теплоизоляционный материал 1 заподлицо с изоляцией панели. Место стыка штукатурят или закрывают асбестоцементными плитами. В местах стыков тепловая изоляция получается ослабленной и нередко служит очагом конденсации влаги на наружной поверхности стены и внутри изоляции.



**Рис. 3.17** Изоляция стены многоэтажного холодильника

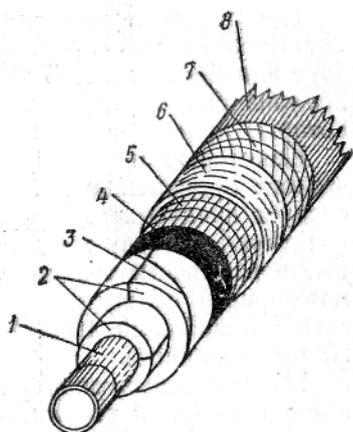
Современные одноэтажные холодильники имеют наружный каркас или внутренний (рис. 3.18), состоящий из стальных колони 6 и балок 10 или ферм. К колоннам крепятся изолированные шитые панели 7, а на балки укладываются потолочные панели 8. Изолированные многослойные панели типа "сэндвич" имеют наружную 14 и внутреннюю 15 оболочки из стального или алюминиевого листа толщиной 0,8-1,0 мм (иногда гофрированного) и заполнены пенополиуретаном 11, имеющим коэффициент теплопроводности 0,019-0,020 Вт/(м·К). Панели выполняются шириной 1,2-1,5 м и длиной до 24 м. Они могут монтироваться или горизонтально (как показано на рисунке), или вертикально, как это делается при строительстве одноэтажных высотных холодильников.



**Рис. 3.18** Изоляция одноэтажного холодильника сборными панелями (сэндвичами)

К элементам стального каркаса плиты присоединяются крепежными деталями. В стык между панелями укладывается пенополиуретановая лента 12 (или заливается пенополиуретан), и стык закрывается эластичной замазкой 13. Железобетонная плита основания 1 холодильника обычно укладывается непосредственно на грунт (на укатанный слой гравия толщиной около 1 м). В плиту закладываются электронагреватели 2 или трубы для обогрева пола. На плиту наносится пароизоляционный слой 3, а по нему выполняется слой тепловой защиты 4. Таким образом создается непрерывность тепло- и пароизоляции вокруг всего охлаждаемого объема, причем теплоизоляционный материал в панелях оказывается хорошо защищенным от увлажнения металлическими оболочками. Последним слоем является чистый пол 5. По плитам покрытия может настилаться кровля 9. Применение легких и стандартных элементов позволяет строить холодильники такого типа даже большой емкости в короткие сроки (6 - 8 месяцев) Масса строительных и конструкционных материалов для такого холодильника примерно в десять раз меньше массы материалов, необходимых для строительства холодильника такой же площади, но выполненного традиционным способом.

Предметом особых забот должно быть обеспечение непрерывности тепловой и влажностной защиты холодных трубопроводов и аппаратов, так как опасность увлажнения теплоизоляционного материала здесь особенно велика в связи с тем, что металлическая труба является абсолютно непроницаемым пароизоляционным слоем с холодной стороны. Конструкция изоляции холодного трубопровода приведена на рис. 3.19. Изолируемую поверхность трубы тщательно очищают и покрывают слоем битума 1 для защиты ее от коррозии и для приклеивания теплоизоляционного материала 2 (на рисунке показана труба, изолируемая скорлупами в два слоя). На последний слой теплоизоляции наклеивают пароизоляционную бумагу или наносят слой холодной битумной мастики 4. По бумаге или при нанесении мастики по теплоизоляционному материалу трубопровод обматывают мягкой стальной проволокой 3 по спирали, после чего покрывают проволоочной сеткой 5, на которую наносят штукатурку 6 (асбестоцементную). Высохшую штукатурку очень целесообразно оклеить (или обмотать) мешковиной 7 и окрасить масляной краской 8. Так же тщательно должны быть закрыты торцы изоляции в местах присоединения труб к аппаратам или фасонным частям. Защиту изоляции трубопроводов, проходящих вне помещений, следует выполнять особенно тщательно; иногда для этой цели применяют металлические кожухи.



**Рис. 3.19 Конструкция изоляции холодного трубопровода**

4. Изоляционная конструкция должна по возможности восполнять недостающие качества теплоизоляционного материала.

При рассмотрении свойств теплоизоляционных материалов указывалось, что материалов, полностью удовлетворяющих всем предъявляемым к ним требованиям, не существует. Поэтому часто приходится применять материалы, наиболее доступные, даже в том случае, если они обладают и нежелательными свойствами. В таком случае изоляционной конструкции должны быть предусмотрены элементы, позволяющие уменьшить влияние этих свойств материалов на работу изоляционной конструкции. Можно показать применение этого положения на некоторых примерах.

Иногда приходится применять сгораемые или неогнестойкие материалы. Для уменьшения возможных вредных последствий от пожара изоляцию изоляционный слой разбивается на отсеки

при помощи горизонтальных и вертикальных противопожарных поясов шириной 500 мм из несгораемых изоляционных материалов, например из асбовермикулитовых или перлитогелевых плит.

В случае возникновения пожара огонь локализуется в пределах одного отсека и не сможет распространиться дальше по изоляционному слою. Обычно максимальная площадь отсека для сгораемых материалов не должна превышать  $500 \text{ м}^2$ , для трудносгораемых -  $1000 \text{ м}^2$ .

Некоторые теплоизоляционные материалы имеют недостаточную механическую прочность, и на них нельзя передавать нагрузку того или иного вида. В этом случае в изоляционной конструкции должны быть предусмотрены силовые (разгрузочные) элементы, которые примут на себя вес груза или другую нагрузку.

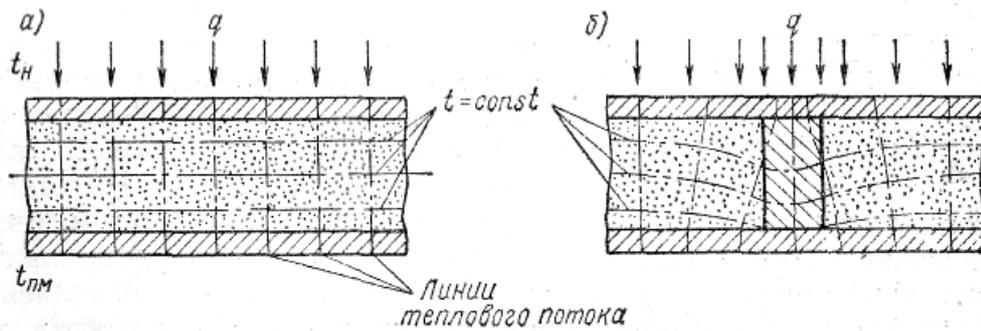
Некоторые теплоизоляционные материалы, особенно органического происхождения, разрушаются грызунами. В этом случае следует предусматривать в конструкциях элементы, которые препятствуют доступу грызунов в изоляцию. Например, по внутренней поверхности теплоизоляции стен (со стороны охлаждаемого помещения) на высоту до 70 см от пола укладывают стальную сетку с ячейками  $10 \times 10 \text{ мм}$  или слой стеклянной ваты (10- 20 мм толщиной).

На некоторых зарубежных холодильных установках применяют систему постоянного осушения изоляции в процессе ее эксплуатации при недостаточно хорошем слое пароизоляции или при невозможности по тем или иным причинам выполнить слой пароизоляции необходимой толщины. В этой системе парциальное давление водяного пара у холодной поверхности ограждения понижается ниже давления водяного пара в воздухе охлаждаемого помещения; таким путем можно добиться, чтобы линия давления пара  $p_x$  (например, на рис. 3.5, а), выходя из точки d, шла с таким увеличенным наклоном, который обеспечил бы ее расположение во всем ограждении ниже линии давления насыщенного пара  $p''_x$ . Достигается это тем, что у внутренней поверхности всех ограждений в изоляции прокладываются каналы с окнами (при изоляции ограждений плитами теплоизоляционного материала выдалбливают желобки в самих плитах), по которым циркулирует осушенный воздух, поглощающий влагу из изоляции. Для осушения воздух из каналов направляют в воздухоохладитель, где он охлаждается, а влага из него выпадает в виде инея на поверхности воздухоохладителя; если же такое осушение не позволяет достичь необходимой сухости воздуха, воздух пропускают через химические осушители, в которых влага поглощается адсорбентами. Подобный метод может применяться и для сушки (восстановления) увлажненной изоляции при ее ремонте.

### § 3.7.

#### **РАСЧЕТ ТЕПЛОПРИТОКОВ ЧЕРЕЗ ИЗОЛИРОВАННЫЕ ОГРАЖДЕНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ В НИХ ТЕПЛОВЫХ МОСТИКОВ**

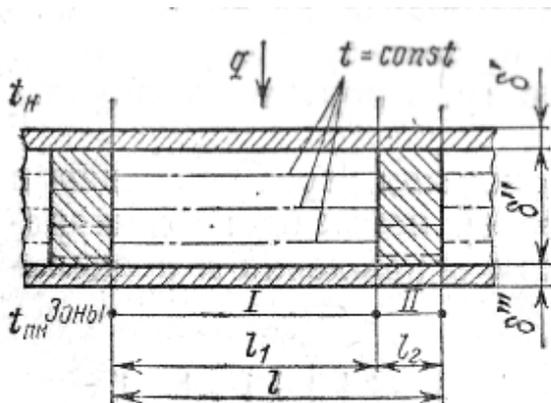
В ряде случаев при выполнении изоляционных конструкций необходимо в слое теплоизоляционного материала разместить элементы (включения), теплопроводность которых значительно выше теплопроводности теплоизоляционного материала. Наличие такого рода конструктивных элементов связано с недостаточной механической прочностью теплоизоляционного материала или с необходимостью усиления прочности и жесткости ограждения. Последнее особенно часто встречается в транспортных холодильных установках.



**Рис. 3.20** Линия теплового потока и изотермические поверхности в изолированном ограждении

Все предыдущие расчеты теплопрохождения через ограждения строились на предположении, что тепловой поток идет по направлению, перпендикулярному поверхности ограждения и с одинаковой плотностью, а линии теплового потока параллельны друг другу. По этой причине изотермические поверхности в ограждении оказывались параллельными поверхности ограждения (рис. 3.20, а). Включение в слой теплоизоляционного материала элементов с более высокой теплопроводностью вызывает в них концентрацию теплового потока, а такие искривление линий потока, поэтому искривляются и изотермические поверхности (рис. 3.20, б). Искривление происходит не только в самом включении, но распространяется и на соседние к нему участки теплоизоляционного материала, и оно тем больше, чем значительнее отличаются друг от друга коэффициенты теплопроводности теплоизоляционного материала и материала включения. Если коэффициент теплопроводности материала включения не слишком значительно (примерно до 10 раз) отличается от коэффициента теплопроводности теплоизоляционного материала, то вычисление коэффициента теплопередачи можно упростить, придав изотермам, более простой характер протекания, но отличающийся от действительного. Применяются два способа расчета такого рода конструкций.

По первому способу изоляционную конструкцию разбивают на зоны мысленными, абсолютно нетеплопроводными и бесконечно тонкими перегородками (мембранами), перпендикулярными поверхности ограждения (рис. 3.21; зоны I и II). Таким образом, каждая зона должна включать однородную часть конструкции, а вся конструкция оказывается состоящей из параллельно включенных проводников теплоты. Изотермические поверхности в каждой зоне параллельны поверхности ограждения, но смещены по отношению к соседней зоне, поскольку в более теплопроводном элементе происходит уплотнение линий теплового потока.



**Рис. 3.21** Изотермические поверхности в ограждении при расчете по первому способу

При параллельном включении проводников теплоты общее количество теплоты, проходящее через ограждение, равняется сумме количеств теплоты, проходящих через каждую зону. Для каждой из зон определяют коэффициент теплопередачи. Все величины, относящиеся к той или иной зоне, принято отличать подстрочным индексом, соответствующим данной зоне, а величины,

относящиеся к слоям, - надстрочным индексом. Величины, относящиеся ко всему ограждению, обозначают буквами без индексов (кроме коэффициента теплопередачи, который имеет обозначение способа, по которому он найден). Так, для первого способа

$$(3.29) \quad Q = k_{1cn} F(t_n - t_{пм})$$

По условию первого способа

$$(3.30) \quad Q = Q_1 + Q_2 + \dots = k_1 F_1(t_n - t_{пм}) + k_2 F_2(t_n - t_{пм}) + \dots ;$$

$$k_1 = 1 / (1/\alpha_n + \delta'/\lambda'_1 + \delta''/\lambda''_1 + \dots + 1/\alpha_{пм})$$

$$k_2 = 1 / (1/\alpha_n + \delta'/\lambda'_2 + \delta''/\lambda''_2 + \dots + 1/\alpha_{пм})$$

здесь  $F_1$  и  $F_2$  – площади зон.

Разделив (3.30) на (3.29), можно получить

$$(3.31) \quad k_{1cn} = k_1 (F_1/F) + k_2 (F_2/F) + \dots$$

Если конструкция ограждения не меняется в направлении, перпендикулярном плоскости чертежа, то можно вычислить коэффициент теплопередачи ограждения для полосы шириной в 1 м. Тогда

$$(3.31a) \quad k_{1cn} = k_1 (l_1/l) + k_2 (l_2/l)$$

По второму способу ограждение мысленно делят на слои абсолютно теплопроводными перегородками (мембранами), Параллельными поверхности ограждения. По абсолютно теплопроводным мембранам тепловой поток, переходящий из одного слоя в другой, перераспределяется, направляясь в основном по наиболее теплопроводному участку. В каждом слое линии теплового потока параллельны друг другу, но тепловой поток в нем движется независимо от того, как он шел в предыдущем. В расчете по этому способу предполагается, что ограждение представляет собой ряд последовательно включенных термических сопротивлений, вследствие чего общее термическое сопротивление ограждения равно сумме термических сопротивлений отдельных слоев. Общее термическое сопротивление

$$(3.32) \quad R_{2cn} = R_n + R' + R'' + \dots + R_{пм}$$

Здесь каждый слой, состоящий из разнородных материалов (например, второй слой на рис. 3.21), можно рассматривать как соответствующее количество проводников, включенных параллельно. В таком случае общая проводимость слоя равна сумме проводимостей каждой ветви, т.е.  $1/R' = 1/R'_1 + 1/R'_2 + \dots$ ;  $1/R'' = 1/R''_1 + 1/R''_2 + \dots$  и т.д. По существу, для слоя, состоящего из нескольких материалов, вводится понятие эквивалентного коэффициента теплопроводности  $\lambda_{экр}$ , равного сумме коэффициентов теплопроводности материалов слоя, взятых пропорционально площади, занимаемой материалом в слое, т. е. для второго слоя  $\lambda''_{экр} = \lambda''_1(F_1/F) + \lambda''_2(F_2/F)$ . Тогда  $R'' = \delta'' / \lambda''_{экр}$ , а

$$(3.33) \quad R_{2cn} = 1/\alpha_n + \delta' / [\lambda'_1(F_1/F) + \lambda'_2(F_2/F)] + \delta'' / [\lambda''_1(F_1/F) + \lambda''_2(F_2/F)] + \dots + 1/\alpha_{пм}$$

Коэффициент теплопередачи ограждения  $R_{2cn} = 1 / R_{2cn}$ . Первый способ дает преуменьшенное значение коэффициента теплопередачи, поскольку при этом способе в ограждении предполагается наличие абсолютно нетеплопроводных перегородок, исключая влияние теплопроводных элементов на теплоизоляционный материал, в то время как второй способ дает преувеличенные результаты, так как в ограждение вводятся предположительно элементы абсолютно теплопроводные. В приближенных расчетах можно ограничиваться определением по первому способу, как наиболее приближающемуся к действительной физической картине процесса. Иногда для уточнения при заметной разнице между коэффициентами, полученными по обоим способам,

за расчетное значение коэффициента теплопередачи ограждения принимают среднее арифметическое из значений, полученных по первому и второму способам, т. е.  $k = (R_{1cn} + R_{2cn})/2$ .

Оба рассмотренных способа дают результаты, очень отличающиеся друг от друга и от действительного значения коэффициента теплопередачи в случае наличия в ограждении элементов (включений), выполненных из материалов (например, из стали), теплопроводность которых значительно отличается от теплопроводности теплоизоляционного материала (коэффициент теплопроводности стали в 1000 раз больше коэффициента теплопроводности пенополистирола).

Для определения коэффициента теплопередачи изолированного ограждения, включающего такого рода металлические элементы, предложено несколько методов. Одним из распространенных способов является метод, разработанный Е. Б. Иоэльсоном и А. Е. Ниточкиным для расчета судовой изоляции. Этот метод представляет собой уточнение первого способа и позволяет в определенной степени учесть концентрацию линий теплового потока, вызванную наличием элементов с высокой теплопроводностью. Как и в первом способе, конструкцию разбивают нетеплопроводными перегородками (мембранами) на зоны, не только однотипные, но и со своим, присущим им характером направления линий теплового потока. В этом методе пренебрегают термическими сопротивлениями теплоотдачи у поверхностей ограждения и термическими сопротивлениями стальных обшивок и стальных элементов конструкции (набора). В связи с этим температуру обшивки и стальных элементов (включений) считают равной температуре наружного воздуха. Основной предпосылкой метода является предположение, что линии теплового потока, идущие от боковых поверхностей стальных элементов конструкции через изоляционный материал, являются дугами окружностей. По этой причине рассматриваемый метод называют методом круговых потоков.

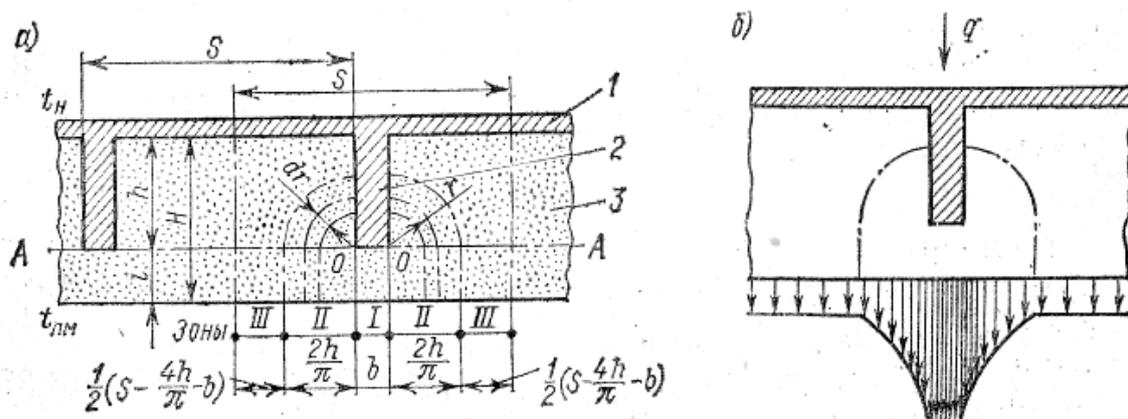


Рис. 3.22 Изолированное ограждение с металлическими ребрами

На рис. 3.22, а показана конструкция ограждения с металлической обшивкой 1 и ребрами 2 шириной  $b$  и высотой  $h$ . В ограждении применен изоляционный материал 3 с  $\lambda_{из}$ . Расчет коэффициента теплопередачи ограждения обычно ведется для полосы шириной в 1 м. При разбивке ограждения на зоны прежде всего выделяется зона I шириной  $b$  (площадью  $F = lb \text{ м}^2$ ), находящаяся под стальным элементом конструкции. Линии теплового потока здесь перпендикулярны основанию ребра  $b$ . Термическое сопротивление первой зоны  $R_1 = i / \lambda_{из}$

Секундное количество теплоты (Вт), проходящее через первую зону,

$$Q_1 = F_1(t_n - t_{лм}) / R_1 = \lambda_{из} b \Delta t / i.$$

В целях некоторого упрощения расчета целесообразно для каждой зоны вычислять ее теплопроводимость, т. е. произведение коэффициента теплопередачи зоны на ее площадь:  $K_i = k_i F_i$ . Эта величина представляет собой количество теплоты, проходящее через зону при разности температур по сторонам ограждения в 1 К. Так как  $K_i = Q_i / \Delta t_i$ , то теплопроводимость первой зоны (Вт/К)

$$(3.34) \quad K_1 = \lambda_{из} b / i.$$

За зону II принимают участки, на которые распространяется влияние искривления линий теплового потока из-за наличия стального ребра. Метод круговых потоков предполагает, что линии теплового потока в этой зоне, идущие от боковых поверхностей ребра, представляют собой дуги окружностей, проведенных радиусом  $r$  из центра, находящегося в ближайшем углу ребра (точки  $O$  на рисунке). От границы ребер (прямая  $AA$ ) линии теплового потока становятся перпендикулярными поверхности ограждения.

Элементарная теплопроводимость участка зоны II шириной  $dr$  может быть вычислена с учетом того, что путь теплового потока по дуге равен одной четвертой части длины окружности

$$(3.35) \quad dK_2 = dr / [i/\lambda_{из} + \pi r/(2\lambda_{из})] = \lambda_{из} dr/(i + \pi r/2).$$

Теплопроводимость зоны II может быть получена путем интегрирования уравнения (3.35) от  $r_{min}$  до  $r_{max}$ . Минимальный радиус дуги  $r_{min} = 0$ . Максимальный радиус  $r_{max}$  находится из тех соображений, что тепловой поток пойдет по пути наименьшего сопротивления и, следовательно, самый длинный путь по дуге окружности не может превышать длину пути по перпендикуляру от поверхности слоя I до прямой  $AA$ , т. е.  $\pi r_{max}/2 = h$  или  $r_{max} = 2h/\pi$ .

Так как зона II состоит из двух участков пути круговых потоков, то полная теплопроводимость этой зоны

$$K_2 = 4 (\lambda_{из}/\pi) \ln [(i + h)/i]$$

Площадь зоны III получается вычитанием площади зон I и II из общей площади рассматриваемого участка ограждения  $F_3 = S - b - 4h/\pi$ . Следует заметить, что цилиндрические поверхности радиуса  $r_{max}$  представляют собой воображаемые нетеплопроводные мембраны, отделяющие зону II от зоны III на этом участке.

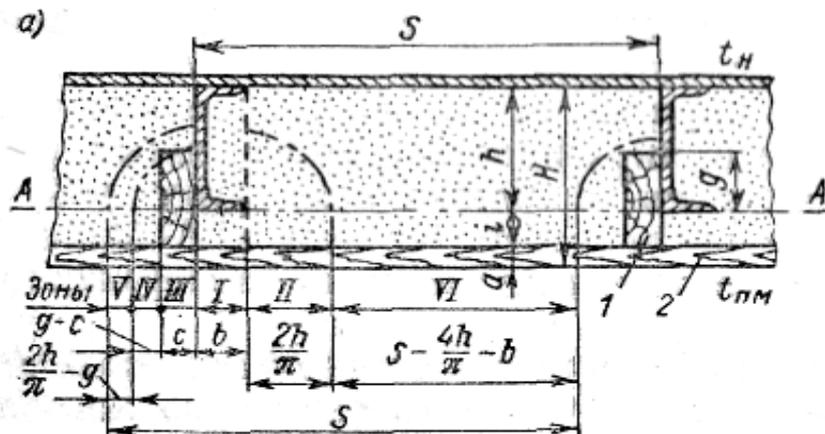
Теплопроводимость зоны III

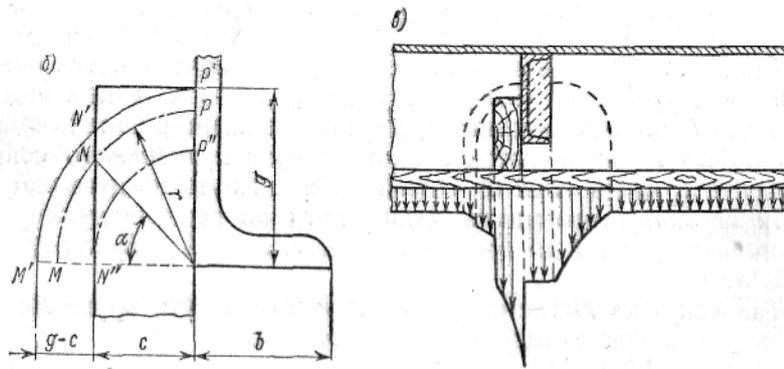
$$(3.36) \quad K_3 = \lambda_{из} F_3 / H = \lambda_{из} (S - b - 4h/\pi)/H$$

Коэффициент теплопередачи ограждения

$$(3.37) \quad k = (K_1 + K_2 + K_3)/F \quad \text{или} \quad k = (\lambda_{из}/S) \{ b/i + (4/\pi) \ln [(i + h)/i] + (S - b - 4h/\pi)/H \}$$

Интенсивность теплового потока, вычисленная по найденным зависимостям для такой изоляционной конструкции, показана на рис. 3.22, б. Здесь видны значительная интенсивность проникновения теплоты в месте расположения ребра и постепенное ее понижение в зоне, на которую распространяется влияние искривления линий теплового потока. Наименьшее значение интенсивности теплового потока соответствует коэффициенту теплопередачи ограждения без тепловых мостиков.





**Рис. 3.23** Нормальная конструкция судовой изоляц

Нормальная конструкция судовой изоляции охлаждаемых помещений обычно включает в себя еще деревянные бруски 1, к которым крепится внутренняя, большей частью деревянная, обшивка 2 (рис. 3.23, а), Коэффициент теплопроводности деревянных элементов обозначен  $\lambda_d$ .

Появление дополнительных конструктивных элементов в ограждении увеличивает число расчетных зон. Зона I остается без изменений и включает в себя область под полкой стального элемента

$$(3.38) \quad K_1 = b / (i / \lambda_{из} + \alpha / \lambda_d) = \lambda_{из} b / (i + \alpha \lambda_{из} / \lambda_d)$$

Зона II соответствует половине зоны II предыдущего случая

$$K_2 = \int_0^{2h/\pi} dr / [\pi r / (2\lambda_{из}) + i / \lambda_{из} + \alpha / \lambda_d] = (2/\pi) \ln[(h/\lambda_{из} + i/\lambda_{из} + \alpha/\lambda_d) / (i/\lambda_{из} + \alpha/\lambda_d)]$$

Окончательно

$$(3.39) \quad K_2 = (2\lambda_{из}/\pi) \ln [(h + i + \alpha \lambda_{из} / \lambda_d) / (i + \alpha \lambda_{из} / \lambda_d)]$$

Зона III представляет собой путь теплового потока по деревянному бруску; для нахождения теплопроводности можно интегрировать уравнение (3.35), подставляя в качестве верхнего предела радиус, равный толщине бруска  $c$ ,

(3.40)

$$K_3 = \int_0^c \lambda_d dr / (\pi r / 2 + i + \alpha) = (2\lambda_d / \pi) \ln[(\pi c / 2 + i + \alpha) / (i + \alpha)]$$

Зона IV образует смешанный круговой путь теплоты сначала по дереву, а затем по теплоизоляционному материалу. Ширина этой зоны  $g-c$ . Интегрирование уравнения (3.35) выполняется в пределах от  $c$  до  $g$ . Для вычисления длины кругового пути по дереву и теплоизоляционному материалу можно воспользоваться тем, что длина дуги окружности равна произведению радиуса на величину центрального угла. На рис. 3.23, б зона IV показана в увеличенном масштабе. Длина кругового пути в изоляционном материале изменяется от 0 при  $r = c$  до  $N'M'$  при  $r = g$ . Размер текущей дуги  $NM = r\alpha = r \arccos(c/r)$ . Длина кругового потока в дереве изменяется от  $P''N''$  при  $r = c$  до  $P'N'$  при  $r = g$ . Длина текущей дуги  $PN = r(\pi/2 - \alpha) = r \arcsin(c/r)$ . Теперь можно написать выражение для теплопроводности зоны IV

$$K_4 = \int_c^g dr / [(r/\lambda_o) \arcsin(c/r) + (r/\lambda_{из}) \arccos(c/r) + i/\lambda_{из} + \alpha/\lambda_o]$$

Так как численное значение количества теплоты зоны IV относительно невелико, то нет нужды в решении этого интеграла. С достаточной для практики точностью можно вычислять тепло-проходимость по дуге среднего радиуса  $r_{cp} = (c + g)/2$ . Тогда

$$(3.41) \quad K_4 = \lambda_{из}(g - c) / \{[(c + g)/2] [(\lambda_{из}/\lambda_d) \arcsin(2c/(c + g)) + \arccos(2c/(c + g)) + i + \alpha \lambda_{из}/\lambda_d]\}$$

Зона V является остаточной зоной круговых потоков. Она имеет ширину  $2h/\pi - g$  и может оказаться только в том случае, если  $2h/\pi > g$ . Для вычисления теплопроводности этой зоны также можно воспользоваться численным значением длины пути по дуге среднего радиуса зоны  $r_{cp} = (2h/\pi + g)/2 = h/\pi + g/2$ . В этом случае длина кругового пути

$$(\pi/2)(h/\pi + g/2) = h/2 + \pi g/4.$$

Тогда

$$(3.42) \quad K_5 = \lambda_{из} (2 h/\pi - g) / (h/2 + \pi g/4 + i + \alpha \lambda_{из} / \lambda_d).$$

При вычислении  $K_5$  пренебрегают наличием выступа деревянного бруска над дугой N'P' из-за малого его влияния.

Наконец, остается зона VI, являющаяся областью неискаженного теплового потока. Она имеет ширину  $S - b - 4 h/\pi$ , а ее теплопроводимость

$$(3.43) \quad K_6 = \lambda_{из} (S - b - 4 h/\pi) / (h + i + \alpha \lambda_{из} / \lambda_d)$$

Коэффициент теплопередачи ограждения

$$(3.44) \quad k = \Sigma K_i / S = (K_1 + K_2 + \dots + K_6) / S$$

Примерная интенсивность теплового потока в различных зонах ограждения показана на рис. 3.23, в. Обращает на себя внимание резкое увеличение теплового потока в месте примыкания деревянного бруска к стальному элементу.

Допущения, какие сделаны в методе круговых потоков, приводят к некоторым отклонениям расчетных величин от действительных, так как процесс теплопрохождения через рассматриваемые конструкции значительно сложнее его упрощенного представления методом круговых потоков. Оказывают влияние и мелкие, не учитываемые расчетом тепловые мостики (например, различные крепежные детали), наличие швов в теплоизоляционном слое и ухудшение качества изоляционной конструкции в условиях различных деформаций, каким подвергаются элементы корпуса судна. Влияние сделанных допущений различно. Пренебрежение термическими сопротивлениями теплоотдачи к поверхностям ограждений и термическими сопротивлениями металлических частей конструкции увеличивает расчетный коэффициент теплопередачи против действительного значения. В то же время внесение в конструкцию предполагаемых нетеплопроводных перегородок между зонами преуменьшает результат расчета. Нередко коэффициент теплопередачи, полученный методом круговых потоков, увеличивают на 20%, полагая таким образом компенсировать вероятную погрешность метода. Не соответствует действительности и допущение о равенстве температуры стальных частей конструкции температуре наружного воздуха. Несомненно, что температура стальных включений в изоляцию ниже температуры наружного воздуха, в ряде случаев это обстоятельство является причиной конденсации водяного пара из воздуха на наружной обшивке судов-холодильников в местах примыкания к ней стальных ребер (стального набора). Ввиду сложности действительной картины процесса в ответственных случаях производят проверочные испытания отдельных участков изоляционной конструкции в натуральную величину или их моделей в условиях ожидаемых температур. Хорошие результаты, особенно в случаях сложной конфигурации металлических элементов, дает применение экспериментального метода электротепловых аналогий.

### § 3.8.

## **НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ПРОИЗВОДСТВА ИЗОЛЯЦИОННЫХ РАБОТ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ИЗОЛИРОВАННЫХ ОГРАЖДЕНИЙ**

Тщательное выполнение работ по изоляции ограждений является одним из главных условий долговечности и надежности изоляционной конструкции. Изоляционные работы всегда являются скрытыми, так как установить качество их выполнения после окончания работ оказывается практически невозможным ввиду того, что элементы конструкции, требующие наибольшей тщательности выполнения, оказываются закрытыми последующими слоями ограждения. Поэтому при выполнении изоляционных работ должна производиться промежуточная (пооперационная) приемка подготовленной под изоляцию поверхности, нанесенного слоя пароизоляции и затем слоя теплоизоляции. Каждый последующий слой разрешается выполнять после приемки предыдущего.

При освидетельствовании обмазочной пароизоляции, которая наносится не менее чем в два слоя, проверяется одинаковость толщины слоя в различных местах поверхности, непрерывность слоя, плотность его прилегания к поверхности, тщательность выполнения слоя в местах прохода трубопроводов или каких-либо других деталей через пароизоляцию. При осмотре наклеенной пароизоляции, кроме того, проверяется герметичность стыков, выполняемых с перекрытием полотнищ, и отсутствие острых углов и переломов в местах сочленения поверхностей.

Во время осмотра теплоизоляции проверяют соответствие изоляционной конструкции проекту, соответствие толщины слоя теплоизоляции проектному размеру, плотность наклейки штучных материалов, перекрытие швов, тщательность заделки швов, правильность поверхности. При производстве работ следует наблюдать за тем, чтобы при наклейке теплоизоляционного материала не образовывался промежуточный пароизоляционный слой.

Большое значение имеет правильная эксплуатация изоляционных конструкций. Прежде всего необходимо следить за состоянием ограждений и принимать меры к немедленному их ремонту. Течи в кровлях, трещины в наружных стенах часто оказываются причиной увлажнения изоляции. Следует также вести наблюдение за состоянием ограждений и с внутренней стороны здания. Повреждения поверхности ограждений (например, тележками) должны немедленно устраняться. Не следует нарушать установленный температурный режим в охлаждаемом помещении. Длительное и значительное повышение температуры в помещении при наличии пароизоляционного слоя с наружной стороны в зимнее время может вызвать конденсацию влаги в ограждении, так как пароизоляционный слой в данном случае окажется с холодной стороны изоляции. Значительное понижение температуры в помещении также может вызвать появление зоны конденсации в изоляции, так как сопротивление имеющегося пароизоляционного слоя может оказаться недостаточным при увеличившейся разности парциальных давлений пара. При таком понижении температуры из-за недостаточно низкого, не соответствующего увеличенной разности температур коэффициента теплопередачи ограждения, на наружной поверхности ограждения может конденсироваться водяной пар из воздуха. Поэтому существенному понижению температуры в охлаждаемом помещении должно обязательно предшествовать необходимое изменение изоляционной конструкции.

Для наблюдения за состоянием изоляции желательны регулярная проверка коэффициента теплопередачи ограждений измерителями тепловых потоков и регулярная проверка влажности изоляционных материалов путем взятия проб из сомнительных мест. Сравнение результатов проверки изоляции с расчетными величинами или с данными предыдущих испытаний дает основание для суждения о качестве изолированного помещения и о происшедших изменениях свойств теплоизоляционного и пароизоляционного материалов,

# РАСЧЕТ ТЕПЛОПРИТОКОВ В ОХЛАЖДАЕМЫЕ ПОМЕЩЕНИЯ

## § 4.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Расчет теплопритоков состоит в последовательном учете количеств теплоты, поступающих в охлаждаемое помещение (в охлаждаемый аппарат) от каждого из различных источников теплоты, которые могут оказать влияние на установление и поддержание заданного теплового режима в охлаждаемом объекте. Конечной целью расчета теплопритоков является нахождение для каждого охлаждаемого помещения производительности камерного холодильного оборудования, достаточного для отвода всей поступившей теплоты и для поддержания тем самым заданных температурных условий воздушной (или иной) среды внутри этого помещения (аппарата). Кроме того, расчет теплопритоков позволяет найти холодильную мощность оборудования машинного отделения, необходимую для поддержания заданной температуры во всех охлаждаемых помещениях (аппаратах), имеющихся на предприятии. Поскольку в задачу расчета входит определение производительности охлаждающих приборов (а затем и площади их поверхности) для каждого охлаждаемого помещения, то это заставляет выполнять расчет теплопритоков отдельно по каждому помещению (аппарату), что при проектировании больших предприятий оказывается довольно трудоемким. Поэтому расчет теплопритоков выполняют обычно путем сведения всех расчетных данных в таблицы. Значительное ускорение расчета получается при использовании ЭВМ.

В установившемся состоянии в охлаждаемое помещение будут проникать, и возникать внутри самого помещения (аппарата) следующие виды теплопритоков: 1) теплоприток от окружающей среды  $Q_1$ , вызванный проникновением теплоты через ограждения; 2) теплоприток от продуктов (грузов)  $Q_2$  при их термической обработке или выделение теплоты при совершении реакций; 3) теплоприток с наружным воздухом  $Q_3$  при вентиляции помещений; 4) эксплуатационные (прочие) теплопритоки  $Q_4$  от различных источников. Сумма всех теплопритоков  $Q = \sum Q_i$  в данный момент времени определяет тепловую нагрузку на холодильное оборудование.

Важнейшей особенностью теплопритоков, накладывающей отпечаток на весь ход расчета, является непостоянство их во времени. Все теплопритоки непрерывно изменяются и в общем случае без достаточной закономерности. Однако теплопритоки  $Q_1$  и  $Q_3$ , обусловленные влиянием наружной окружающей среды, меняются в связи с сезонными и суточными колебаниями температуры и влажности атмосферного воздуха. В свою очередь, величина  $Q_2$  зависит от сезонности поступления грузов или от графика нагрузки на аппараты (реакторы). Другая особенность теплопритоков состоит в том, что их максимальные значения по времени, как правило, не совпадают и могут наблюдаться в разное время суток или года.

Поскольку при машинном охлаждении расходуется механическая энергия, которую трудно аккумулировать в большом количестве, то холодильная установка машинного охлаждения только тогда будет способна отвести все теплопритоки, если ее мощность будет определена по самому неблагоприятному из всех возможных сочетаний. Для того чтобы выбрать этот случай, необходимо составить годовые графики теплопритоков от всех источников, сложить теплопритоки, соответствующие одному и тому же моменту времени, и отыскать такой период (или момент), которому отвечает наибольшая сумма теплопритоков и который окажется, таким образом, наиболее напряженным периодом для всего холодильного оборудования. Такой период может быть назван расчетным периодом, а максимальная сумма теплопритоков (но в общем случае не сумма максимальных значений) - расчетной тепловой нагрузкой, по которой и подбирается или рассчитывается холодильное оборудование. Выбор расчетного периода можно провести и более просто, исходя из следующих соображений. Во-первых, из всех теплопритоков наибольшее численное значение имеют первые два:  $Q_1$  и  $Q_2$  (а на многих предприятиях химической промышленности все другие теплопритоки очень малы по сравнению с  $Q_2$ ). Поэтому достаточно найти период, которому соответствует максимальная сумма этих двух теплопритоков. Во-вторых, что касается теплопритоков со стороны наружного воздуха ( $Q_1$  и  $Q_3$ ), то очевидно, что их максимальное значение совпадает с наиболее жарким временем года в данной местности. Колебания теплопритока  $Q_2$  определяются грузооборотом или графиком нагрузки предприятия. В частном случае максимальные значения обоих теплопритоков могут приходиться на один период

времени (рис. 4.1, а). В этом случае расчетный период совпадает с наиболее жарким временем года, а расчетная нагрузка может быть вычислена путем суммирования максимальных значений теплопритоков:  $Q_{расч} = Q_{1max} + Q_{2max}$ . При несовпадении по времени максимальных значений теплопритоков (рис. 4.1,б) расчетная нагрузка, равная максимальной сумме теплопритоков  $Q_{расч} = (Q_1 + Q_2)_{max}$  в расчетный период  $Z_{расч}$ , окажется меньше суммы максимальных значений теплопритоков  $Q_{1max} + Q_{2max}$ .

Принятие этой последней суммы за расчетную нагрузку в таком случае привело бы к завышению мощности устанавливаемого холодильного оборудования. Расчетный период будет определяться местоположением максимальной суммарной ординаты на графике,

В устройствах безмашинного охлаждения расходуется охлаждающее вещество, и каждая единица проникающей теплоты вызывает соответствующий расход охлаждающего вещества. Оно в данном случае является аккумулятором энергии. Поэтому целью расчета теплопритоков в этом случае является определение суммарного количества подводимой к охлаждаемому объекту теплоты за определенное время и нахождение количества охлаждающего вещества, которое должно быть запасено, чтобы обеспечить охлаждение объекта в течение этого же периода времени.

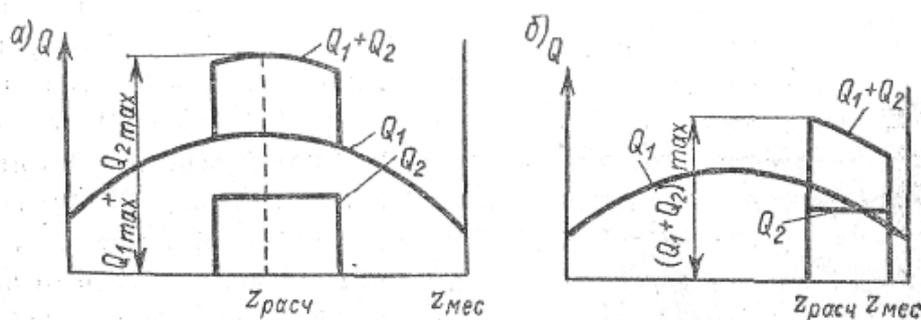
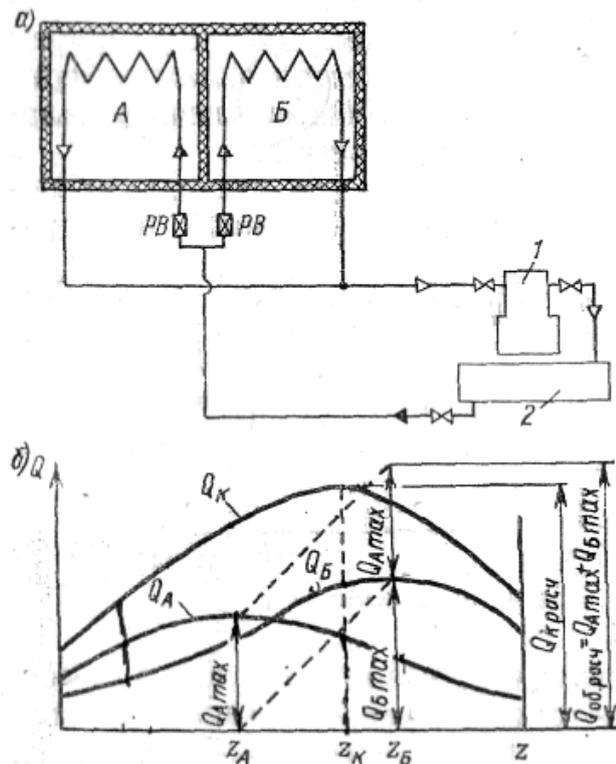


Рис. 4.1. Нахождение расчетного периода

При выполнении расчета теплопритоков для нескольких помещений, охлаждаемых одной холодильной машиной (или несколькими параллельно работающими), возникает еще одна особенность теплопритоков, из которой вытекает разница между расчетными нагрузками на камерное (местное) оборудование и оборудование машинного отделения или, как обычно говорят, на компрессор. Под расчетной нагрузкой на камерное (местное) оборудование понимают величину теплопритоков, определяющую необходимую производительность этого оборудования и его теплопередающую поверхность. Под расчетной нагрузкой на компрессор понимают величину теплопритоков, по которой должна быть определена необходимая холодильная мощность компрессора и другого оборудования машинного отделения. Разумеется, в любой момент времени сумма количеств теплоты, отведенной рабочим телом при посредстве охлаждающих приборов из помещений А и Б (рис. 4.2, а), определяет мощность компрессора  $I$  в этот момент и тепловой поток к конденсатору 2. Иными словами, не может быть разницы между действительной нагрузкой на камерное (местное) оборудование и компрессор в любой момент времени. Изменение теплопритока к охлаждаемому объекту вызывает изменение количества пара холодильного агента, образующегося в охлаждающих приборах; суммирование действительных нагрузок на местное холодильное оборудование осуществляется объединением в компрессоре количеств пара, поступивших из охлаждающих приборов отдельных помещений, что и создает действительную нагрузку на компрессор.



**Рис. 4.2. Нахождение расчетной нагрузки на компрессор и камерное оборудование**

Причиной появления разницы между расчетными нагрузками и камерное оборудование и компрессор является возможное несовпадение по времени максимальных нагрузок на отдельные охлаждаемые помещения (аппараты). На рис. 4.2, б приведены графики теплопритоков для помещений А и Б (линии  $Q_A$  и  $Q_B$ ). Максимальные теплопритоки в эти помещения по времени не совпадают, им соответствуют моменты времени  $Z_A$  и  $Z_B$ . Сумма теплопритоков для обоих помещений в любой момент времени представляет собой действительную нагрузку на компрессор и на рисунке показана линией  $Q_K$ . Естественно в качестве расчетной нагрузки на оборудование для помещения А выбрать максимальный теплоприток в это помещение  $Q_{Amax}$ , а для помещения Б -  $Q_{Bmax}$ . В качестве же расчетной нагрузки на компрессор следует выбрать максимальную сумму теплопритоков  $Q_{K\text{ расч}} = (Q_A + Q_B)_{max}$ , соответствующую моменту  $Z_K$ . Легко видеть, что в этом случае суммарная расчетная нагрузка на оборудование охлаждаемых помещений оказалась больше, чем расчетная нагрузка на компрессор, т. е.

$$Q_{об. расч} = Q_{Amax} + Q_{Bmax} > Q_{K\text{ расч}}$$

Если бы расчетная нагрузка на компрессор была выбрана как сумма расчетных нагрузок на оборудование отдельных помещений (аппаратов), то это также привело бы к завышению необходимой мощности оборудования машинного отделения. Разница между расчетными нагрузками не появилась, если бы максимальные теплопритоки в отдельных помещениях оказались в один и тот же момент времени.

Точный учет всех особенностей теплопритоков при выполнении их расчета, естественно, невозможен. Поэтому приходится встречаться с некоторыми условностями расчета, вызванными необходимостью упрощения трудоемкой работы при определении расчетных нагрузок, а также тем, что расчет ведется в предположении стационарности теплового режима, хотя действительные условия работы холодильных установок отличаются от стационарных.

## § 4.2.

### ТЕПЛОПРИТОК ОТ ОКРУЖАЮЩЕГО ВОЗДУХА ЧЕРЕЗ ОГРАЖДЕНИЯ ОХЛАЖДАЕМЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

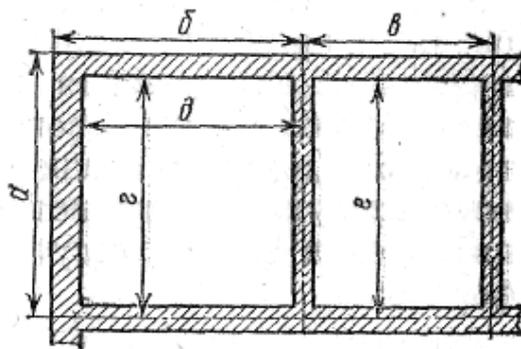
Теплота от окружающей среды проникает внутрь охлаждаемых помещений в результате действия двух процессов: 1) теплопередачи через ограждения вследствие наличия разности температур ( $t_n - t_{пм}$ ) наружной окружающей среды и воздуха внутри помещения (аппарата); 2) поглощения наружной поверхностью ограждений теплоты солнечной радиации. Поэтому

$$Q_1 = Q_{1T} + Q_{1C} \quad (4.1)$$

**Секундный теплоприток ( $Вт$ ), возникающий под влиянием разности температур.** Определяется он по выражению

$$Q_{1T} = k \times F (t_n - t_{пм}) \quad (4.2)$$

где  $k$  — коэффициент теплопередачи ограждения; численные значения его определяются по данным гл. 3;  $F$  - площадь поверхности ограждения.



**Рис. 4.3. Размеры поверхности ограждений на плане здания для расчета теплопритоков**

Общий теплоприток  $Q_{1T}$  в данное охлаждаемое помещение является суммой теплопритоков через каждое из ограждений, ограничивающих это помещение. Определение поверхности ограждений производится в соответствии со следующими указаниями:

- 1) за длину наружных стен угловых помещений принимают размер от наружной поверхности стены до оси внутренней стены (размеры  $a$  и  $b$  на рис. 4.3); длину "наружной стены неуглового помещения находят по размерам между осями внутренних стен (размер  $b$ );
- 2) за длину внутренних стен (перегородок) принимают размер или от внутренней поверхности наружных стен до оси перпендикулярных внутренних стен (размеры  $c$  и  $d$ ), или между осями внутренних стен (размер  $b$ );
- 3) длину и ширину пола и потолка определяют как длину внутренних стен (размеры  $c$  и  $d$  или  $b$  и  $e$ );
- 4) высоту стен в промежуточном этаже и первом этаже, имеющем пол, расположенный на грунте, считают от уровня пола одного этажа до пола другого, т. е. в размер высоты включается толщина перекрытия над данным помещением; в верхнем этаже - от уровня пола до верха засыпки покрытия; в первом этаже над неохлаждаемым подвалом - от уровня потолка подвала до уровня пола вышележащего этажа.

Если теплота передается через наружные ограждения, то температура  $t_n$  является расчетной температурой наружного воздуха.

Ее определение представляет значительные трудности даже в том случае, когда расчетный период установлен, например самый жаркий месяц года. Выбор в качестве расчетной температуры среднемесячной температуры приводит к недоучету возможных, довольно значительных колебаний температуры, вследствие чего в жаркие дни появятся теплопритоки, отвести которые с помощью холодильной установки оказалось бы невозможным из-за недостаточной ее мощности. Возможное влияние, которое оказывают колебания температуры наружного воздуха на состояние воздуха внутри помещений, зависит от теплоустойчивости ограждения или, иными словами, от его массивности [см. (3.5)]. Чем легче ограждение, тем быстрее и с большей амплитудой передадутся

через него к внутренней поверхности ограждения колебания температуры наружного воздуха. Напротив, в массивном ограждении температурные колебания будут затухать в большей степени и к внутренней поверхности проникать с более заметным отставанием по фазе. Таким образом, выбор расчетной температуры наружного воздуха связан с конструкцией ограждения, так как каждой конструкции могут соответствовать такие колебания температуры наружного воздуха, которые вызовут недопустимые колебания температуры на внутренней поверхности ограждения.

Для достаточно массивных ограждений, какими являются ограждения обычных холодильных сооружений, кратковременные циклические изменения температуры наружного воздуха вызывают колебания теплового потока, существенно затухающие внутри ограждения. В связи с этим за расчетную температуру наружного воздуха принимают среднюю температуру наиболее жаркой пятидневки. При отсутствии этих данных можно пользоваться формулой

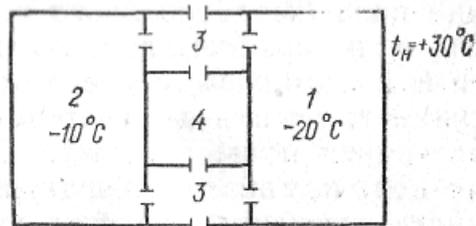
$$t_H = t_{CP \text{ мес}} + 0,25 \times t_{A \text{ м}} \quad (4.3)$$

где  $t_{CP \text{ мес}}$  - среднемесячная температура самого жаркого месяца;  $t_{A \text{ м}}$  - температура абсолютного максимума, т. е. наивысшая температура воздуха, наблюдавшаяся в данном районе.

Расчетную температуру, найденную по выражению (4.3), округляют до целого градуса. Например, для Ленинграда среднемесячная температура июля месяца  $17,5^\circ \text{C}$ , температура абсолютного максимума  $32^\circ \text{C}$ . Тогда  $t_H = 17,5 + 0,25 \times 32 = 25,5 \approx 26^\circ \text{C}$ . В качестве расчетной относительной влажности воздуха принимают среднемесячную влажность самого жаркого месяца, измеряемую в 13 ч. Что касается температуры охлаждаемого помещения  $t_{пм}$ , то она задается технологическими условиями.

При определении количества теплоты, проходящего через внутренние ограждения, отделяющие данное охлаждаемое помещение от других, охлаждаемых или отапливаемых помещений, т. е. от таких помещений, где удерживается вполне определенная температура, ее значение и подставляют в формулу (4.2) вместо температуры  $t_H$ .

При расчете теплопритоков приходится вычислять их и из неохлаждаемых и неотапливаемых помещений, температура в которых не фиксирована. Однако температура в таких помещениях самоустанавливается в результате теплоподвода со стороны наружного воздуха и теплоотвода в смежные охлаждаемые помещения и может быть вычислена из теплового баланса. Так как такие расчеты каждый раз выполнять затруднительно, то обычно пользуются установленными приближенными зависимостями. Так, для определения теплопритоков через стены из неохлаждаемых помещений, имеющих непосредственный выход наружу, за расчетную разность температур принимается 70% от расчетной разности температур для наружных стен.



**Рис. 4.4. К определению теплопритока из неохлаждаемых (и неотапливаемых) помещений**

Если неохлаждаемое помещение не имеет непосредственного выхода наружу, то за расчетную разность температур принимается 60% от разности температур для наружных стен (рис. 4.4). Между охлаждаемыми помещениями 1 и 2 расположены два неохлаждаемых вестибюля 3, имеющие выходы наружу, и неохлаждаемая экспедиция 4, непосредственно не соединяющаяся с наружным воздухом. Расчетная температура наружного воздуха  $t_H = 30^\circ$ . Таким образом, для наружных стен помещения 1 расчетная разность температур  $t_H - t_{пм} = 50^\circ \text{C}$ , а для помещения 2 она будет  $40^\circ \text{C}$ . При определении теплопритока из вестибюлей 3 в помещение 1 за расчетную разность температур будет принято  $0,7 \times 50 = 35^\circ \text{C}$ , а в помещении 2 она окажется  $0,7 \times 40 = 28^\circ \text{C}$ , для теплопритока из экспедиции 4 в помещение 1 расчетная разность температур -  $0,6 \times 50 = 30^\circ \text{C}$ , а в помещении 2 она равна  $0,6 \times 40 = 24^\circ \text{C}$ . При определении теплопритока

через пол из неохлаждаемого подвала расчетная разность температур принимается в размере 50% от разности температур для наружных стен.

Выше говорилось о малой величине плотности теплового потока, идущего из грунта. Поэтому теплоприток через полы, лежащие на грунте, считают только для помещений с отрицательными температурами. Если пол охлаждаемого помещения лежит на непучинистом грунте, то устройств для обогрева грунта не принимают и грунт под зданием может промерзнуть на некоторую глубину. В этом случае тепловой поток, как из нижних слоев грунта, так и с боковых сторон льдогрунтового массива под зданием будет вызывать только таяние льда, но не пройдет через промороженный грунт. Поэтому причиной теплопритока через полулежащий на грунте, считают проникновение теплоты от слоя грунта, имеющего температуру  $0^{\circ}\text{C}$  (от слоя с нулевой изотермой). Для средней полосы СССР глубину промерзания грунта под охлаждаемым зданием принимают приблизительно 3,5 м.

Расчетная формула этого метода определения теплопритока через пол, лежащий на грунте, имеет вид

$$Q_1 \text{ пола} = F \times t_{\text{ПМ}} / R_0 \quad (4.4)$$

где  $F$  - площадь пола помещения;  $t_{\text{ПМ}}$  - температура охлаждаемого помещения (ее абсолютное значение);  $R_0$  — общее термическое сопротивление передаче теплоты от слоя грунта с температурой  $0^{\circ}\text{C}$  воздуху помещения.

Величина  $R_0$  включает термические сопротивления теплопроводности грунта  $R_{\text{ГР}}$  под полом от уровня нулевой изотермы до строительной конструкции пола, теплопроводности  $R_{\text{П}}$  конструкции пола (изолированного или неизолированного) и теплоотдачи  $R_{\text{ПМ}}$  от поверхности пола к воздуху камеры, т. е.  $R_0 = R_{\text{ГР}} + R_{\text{П}} + R_{\text{ПМ}}$ . При расчете помещений с температурой от  $-1$  до  $-2,5^{\circ}\text{C}$  считают, что нулевая изотерма проходит непосредственно под конструкцией пола, а поэтому  $R_{\text{ГР}} = 0$ , т. е.  $R_0 = R_{\text{П}} + R_{\text{ПМ}}$ .

Если пол низкотемпературного помещения, лежащий на грунте, имеет устройство для обогрева, предохраняющее грунт от промерзания, то для любых конструкций пола с обогревом теплоприток через пол определяется по выражению

$$Q_1 \text{ пола} = F \times k_{\text{П}} \times (t_{\text{СР}} - t_{\text{ПМ}}) \quad (4.5)$$

Где  $k_{\text{П}}$  - коэффициент теплопередачи конструкции изолированного пола;  $t_{\text{СР}}$  — средняя температура слоя с нагревательным устройством.

При электрическом обогреве пола электронагревателями в бетонной плите, а также при обогреве жидкостями, протекающими по трубам, уложенным в слой бетона, или паром холодильного агента, конденсирующимся в трубах, за расчетную температуру принимают  $t_{\text{СР}} = +1^{\circ}\text{C}$ . Если применен шанцевый пол, то с учетом неравномерности температур в различных участках воздушных, каналов принимают среднюю температуру слоя с каналами  $t_{\text{СР}} = 3^{\circ}\text{C}$ .

При определении теплопритока  $Q_{\text{П}}$  возникает разница между расчетными нагрузками на компрессор и камерное оборудование из-за различного отнесения на эти статьи теплопритоков через внутренние ограждения, отделяющие охлаждаемые помещения с разными температурами друг от друга. Для выяснения этой разницы рассмотрен пример расчета теплопритока в помещения 1 и 2 только через общую северную наружную стену (НСС) и через внутреннюю стену (ВС), разделяющую эти помещения (табл. 4.1). Все данные, необходимые для расчета, представлены на рис. 4.5.

Теплопритоки через наружные ограждения одинаково учитываются и на компрессор, и на оборудование. Если же обратить

Таблица 4.1

## Пример расчета теплопритоков

№ помещения	$t_{\text{ПМ}}$ , °С	Наименование ограждения	$t_{\text{Н}}$ , °С	$t_{\text{Н}} - t_{\text{ПМ}}$ , °С	$k$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$F$ , м <sup>2</sup>	$Q_{\text{IT}}$ , Вт	
							на компрессор	на оборудование
1	- 15	НСС ВС№2	25	40	0,30	40	480	480
			- 20	-5	0,47	30	- 70	-
Всего по помещению № 1							410	480
2	- 20	НСС ВС№ 1	25	45	0,30	30	405	405
			- 15	5	0,47	30	70	70
Всего по помещению № 2							475	475
Итого по обоим помещениям							885	955

внимание на теплоприток через внутреннюю стену между помещениями 1 и 2, то можно видеть, что для помещения 1 этот теплоприток отрицателен, так как температура этого помещения выше, чем соседнего — 2, в то время как для помещения 2 этот же теплоприток имеет положительный знак. При сложении теплопритоков отдельных помещений для получения нагрузки на компрессор теплопритоки через внутреннюю стену как одинаковые по численному значению, но имеющие различные знаки, сократятся. Таким образом, нагрузку на компрессор будут составлять только теплопритоки через наружное ограждение (НСС).

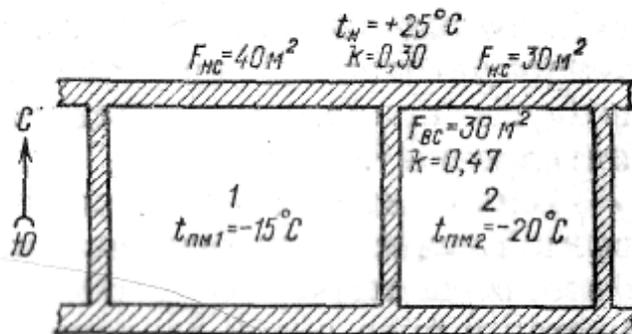


Рис. 4.5. К примеру, расчета теплопритоков через внутренние ограждения

Что касается нагрузки на камерное оборудование, то для ее определения исходят из следующих соображений. В рассматриваемый момент времени работа оборудования помещения 2 с более низкой температурой как бы помогает оборудованию помещения 1 с более высокой температурой, поскольку в низкотемпературную камеру отводится часть теплопритоков (—70 Вт); однако могут быть периоды, когда в помещении 2 не будет поддерживаться столь низкая температура, и тогда ее оборудование не будет помогать работе оборудования помещения 1. Такие периоды будут более тяжелыми для оборудования помещения 1. Поэтому отрицательные теплопритоки не включают в нагрузку на оборудование, что и сделано в табл. 4.1. В период же работы помещения 2 с повышенной температурой нагрузка на компрессор будет, наоборот, понижена.

В связи с этим при выполнении расчета теплопритоков нагрузку на компрессор следует считать по теплопритокам через наружные ограждения и через ограждения неохлаждаемых помещений, причем этот расчет может вестись не по отдельным помещениям, а по отсекам с помещениями одинаковых температур, что упрощает ведение расчета. В нагрузку на оборудование данного помещения кроме этих теплопритоков включают положительные теплопритоки через внутренние

ограждения из смежных охлаждаемых помещений. Такой расчет нагрузки на компрессор, однако, условен, так как он оказывается справедливым только в случаях, когда для охлаждения смежных помещений предусмотрен один компрессор или когда для этой цели предусмотрена группа компрессоров, работающих на одной температуре кипения. Если же для охлаждения каждого из смежных помещений имеются самостоятельные компрессоры, работающие на разных температурах кипения, то теплопритоки через внутренние ограждения войдут в нагрузку каждый на свою температуру кипения, а потому должны быть учтены.

Некоторые охлаждаемые помещения предприятий (обычно из числа имеющих температуру  $0^\circ\text{C}$  и выше) нуждаются в отоплении для поддержания заданных условий в зимнее время. Для таких помещений производят определение теплопотерь, которые могут быть в зимнее время, что позволяет установить необходимую производительность отопительных приборов для каждого из помещений. Метод расчета теплопотерь аналогичен методу определения теплопритоков. В качестве расчетной температуры наружного воздуха принимается средняя температура наиболее холодной пятидневки.

### Теплоприток от солнечной радиации.

Источником рассматриваемой лучистой энергии является солнце, имеющее на поверхности фотосферы температуру  $6000^\circ\text{C}$ . Солнечная энергия распространяется в виде лучей различной длины от  $0,02$  до  $5,0$  мкм, причем длинноволновую часть спектра представляет инфракрасное или тепловое излучение с длиной волны от  $0,75$  до  $5,0$  мкм. Спектральный состав и интенсивность солнечной радиации за пределами земной атмосферы оказываются неизменными, что позволяет характеризовать интенсивность солнечного излучения величиной. Так называемой солнечной постоянной  $J_0$  под которой понимают секундное количество теплоты (Вт), получаемое  $1\text{ м}^2$  поверхности, перпендикулярной к солнечным лучам, на границе земной атмосферы. По актинометрическим измерениям  $J_0 = 1350\text{ Вт/м}^2$ .

При прохождении через земную атмосферу изменяется как спектральный состав, так и интенсивность солнечного излучения вследствие его рассеяния и поглощения составными частями атмосферы. К поверхности земли проникает примерно половина солнечной энергии, пришедшей к границам атмосферы. В свою очередь, атмосфера излучает часть рассеянной теплоты в направлении земной поверхности. Количественный учет полной радиации, включающей прямое и рассеянное излучение, ведется при помощи величины, называемой *напряжением солнечной радиации*  $J$ , под которым понимают секундное количество теплоты (Вт), приходящееся на  $1\text{ м}^2$  поверхности. Напряжение солнечной радиации зависит от географического положения пункта, от ориентации поверхности по отношению к странам света и от угла наклона поверхности. Таблица значений расчетных напряжений солнечной радиации для летнего периода приведена в приложении 1.

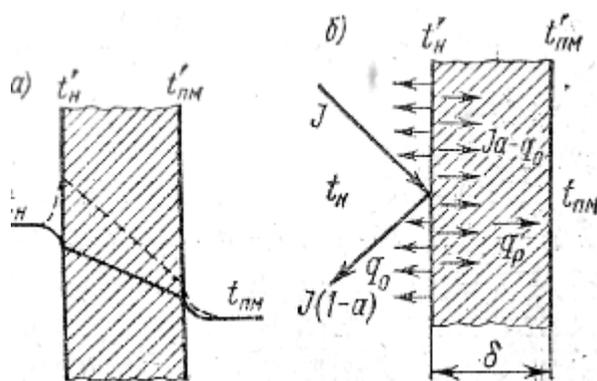


Рис. 4.6. Воздействие солнечного излучения на поверхность ограждения

Видимый эффект солнечного излучений на поверхность ограждения выражается в повышении температуры  $t_n^1$  поверхности, облучаемой солнцем, до температуры более высокой, чем темпера-

тура наружного воздуха  $t_H$ . Если процесс передачи теплоты солнечного излучения через ограждение представлять стационарным, то распределение температур в ограждении при нагревании поверхности радиационной теплотой будет подобно показанному штриховой линией на рис. 4.6, *a*. Часть теплоты, поглощенной поверхностью ограждения, проникает через ограждение внутрь охлаждаемого помещения. Для определения этого количества теплоты можно представить себе, что некоторая поверхность ограждения (рис. 4.6, *б*) подвергается воздействию солнечного излучения с напряжением  $J$ . Доля радиационной теплоты поглощается поверхностью, а численное значение этой доли поглощенной теплоты зависит от цвета и степени шероховатости (состояния) поверхности и определяется коэффициентом поглощения  $a$ . Значения коэффициентов поглощения для некоторых материалов приведены в табл. 4.2.

Таким образом, количество теплоты  $J_A$  будет поглощаться поверхностью, в то время как  $J(1 - a)$  будет отражаться от поверхности. Данные, приведенные в табл. 4.2, показывают, насколько существенна окраска поверхностей ограждений охлаждаемых помещений в светлые тона для уменьшения количества теплоты, поглощаемой наружными ограждениями. Так как поверхность, нагретая солнцем, имеет температуру выше температуры наружного воздуха, то часть  $q_0$  теплоты, полученной единицей поверхности, будет передаваться окружающему воздуху  $q_0 = \alpha_H \times (t_H^1 - t_H)$

От поверхности внутрь ограждения направится тепловой поток  $J_A - q_0$ . В условиях стационарного процесса этот поток проникал бы и внутрь охлаждаемого помещения. Так как в действительности тепловой поток радиационной теплоты не может быть стационарным, то часть теплоты будет оставаться в ограждении, затрачиваясь на нагревание элементов ограждения. Для учета доли теплового потока, которая, в действительном процессе проходит через ограждение, вводится коэффициент проницания  $p$ , равный 0,75—1,0. Тогда следует считать, что через ограждение проходит поток плотностью  $q_p = p \times (J_A - q_0)$  или  $q_p = p \times [J_A - \alpha_H \times (t_H^1 - t_H)]$ . При  $p = 1$   $q_p = J_A - \alpha_H \times (t_H^1 - t_H)$ . Для стационарного процесса в однородном ограждении можно написать такие уравнения плотности теплового потока:

$$q_p = (\lambda/\beta) \times (t_H^1 - t_{пм}^1)$$

$$q_p = \alpha_{пм} \times (t_{пм}^1 - t_{пм})$$

**Таблица 4.2 Коэффициенты поглощения для некоторых материалов**

Материал поверхности	Коэффициент поглощения $a$	Материал поверхности	Коэффициент поглощения $a$
Алюминий полированный	0,20	Краска черная	0,97 - 0,99
Асфальт	0,89	Краска белая	0,12 - 0,26
Бетон	0,68	Оцинкованное железо	0,66
Земляная засыпка на кровле	0,80	Рубероид	0,72 - 0,86
Известковая побелка	0,40	Толь	0,91
Кирпич красный	0,70 - 0,77	Штукатурка светлая	0,40
Кирпич белый	0,26	Штукатурка темная	0,57

Если в трех последних выражениях плотности теплового потока оставить справа только разности температур, а все остальные члены перенести влево и затем сложить эти уравнения, то после преобразования получим:

$$q_p = k \times (J_A / \alpha_H + (t_H - t_{пм})). \quad (4.6)$$

$$q_p = k \times (J_A / \alpha_H) + k \times (t_H - t_{пм}). \quad (4.6a)$$

Второе слагаемое выражения (4.6a) представляет собой плотность теплового потока, проходящего через ограждение под действием разности температур, т. е.  $q_{пт}$ . Следовательно, найденный поток радиационной теплоты включает в себя два тепловых потока:

$$q_p = q_{пс} + q_{пт}$$

первый из которых является результатом превышения температуры поверхности ограждения над температурой наружного воздуха и потому может быть назван избыточным потоком, вызванным действием солнечной радиации, избыточным над потоком  $q_{IT}$  который уже учтен при расчете  $Q_{IT}$ .

Поскольку плотность теплового потока  $q = k \times \Delta t$  и плотность потока  $q_{IC}$  можно представить в таком же виде, обозначив  $J_A / \alpha_H = \Delta t_C$  и назвав эту величину *избыточной разностью температур*, обусловленной действием солнечной радиации. Тогда

$$q_{IC} = k \times \Delta t_C \quad (4.7)$$

или с учетом коэффициента проницания

$$q_{IC} = p \times k \times \Delta t_C \quad (4.7a)$$

Так как коэффициент проницания часто принимают равным 0,75, а коэффициент теплопередачи со стороны наружного воздуха,  $\alpha_H = 23,3 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$ , то выражение для  $\Delta t_C$  (К) можно представить в виде

$$\Delta t_C = 0,75 \times (J_A / 23,3) \quad (4.8)$$

Искомое секундное количество теплоты солнечной радиации  $Q_{IC}$  (Вт), проникающее через ограждение с площадью поверхности  $F$ ,

$$Q_{IC} = k \times F \times \Delta t_C \quad (4.9)$$

Вышеприведенный метод нельзя применить для определения теплопритока от солнечной радиации через чердачные покрытия. В этом случае пользуются следующими значениями избыточной разности температур:

Географическая широта $\varphi$ °	40	50	60
Избыточная разность температур $\Delta t_C$ , К	15	10	5

Необходимо выяснить также, через какие поверхности здания следует учитывать теплоприток от солнечной радиации, имея в виду, что в течение дня все стороны здания, кроме северной, последовательно подвергаются действию солнечного излучения. Так как облучение различных сторон здания происходит в разное время дня, то естественно, что в расчет нельзя принимать теплопритоки через все облучаемые поверхности. Если здание имеет несколько охлаждаемых помещений, то в расчет нагрузки на компрессор принимают теплоприток через покрытие и теплоприток через ту наружную стену, через которую проникает наибольшее количество теплоты во все помещения в один и тот же момент времени. Таковой является стена, которой соответствует наибольшее произведение площади поверхности на расчетное напряжение солнечной радиации. В расчет нагрузки на камерное оборудование следует принимать теплоприток через ту стену, через которую от солнечной радиации проникает наибольшее количество теплоты для данного помещения, и, конечно, через покрытие, если речь идет о расчете помещения, находящегося непосредственно под покрытием. Для пояснения этого положения приведен пример определения теплопритока от солнечной радиации в здание, план которого показан на рис. 4.7. Так как южная стена здания имеет площадь поверхности значительно большую, чем поверхности других облучаемых стен, то, хотя напряжение солнечной радиации для южной стены меньше, чем для восточной и западной стен, произведение  $J \times F$  для нее наибольшее, а потому и теплоприток от солнечной радиации через южную стену окажется наибольшим для всего здания и его следует отнести на компрессор; для помещения 1 наибольшим окажется теплоприток через западную стену, а потому его необходимо отнести на камерное оборудование этого помещения. Аналогичное положение для помещения 3, где наибольшим является теплоприток через восточную стену. В помещении 2 теплопритоки от солнечной радиации на компрессор и камерное оборудование совпадают по численному значению, так как здесь солнцем облучается только южная стена.

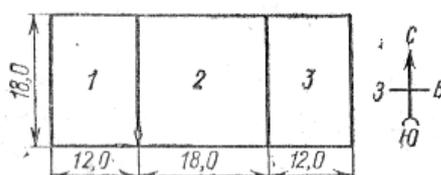


Рис. 4.7. К примеру, определения теплопритоков от солнечного излучения



холода. В этом случае среднее значение секундного теплопритока от обрабатываемых тел должно определяться по выражению

$$Q_2 = G^1 (i_1 - i_2) \times (\tau_{Ц}/\tau_{РБ})/(3,6 \times 24) \quad (4.11a)$$

где  $\tau_{Ц}$  - продолжительность цикла технологической обработки продукта, включающая и время на совершение вспомогательных операций;  $\tau_{РБ}$  - продолжительность рабочего периода, во время которого потребляется холод.

Для отдельных процессов количество отводимой теплоты может быть определено следующим образом.

1. При охлаждении тела

$$Q_2 = G^1 \times C_1 (t_1 - t_2)/(3,6 \times 24), \quad (4.12)$$

где  $C_1$  - теплоемкость охлаждаемого тела;  $t_1$  и  $t_2$  - температура тела соответственно до и после охлаждения.

При термической обработке продуктов, подлежащих последующему хранению при низких температурах, температуру обрабатываемых продуктов  $t_2$  целесообразно понижать до температуры  $t_{ПМ}$  при которой эти продукты будут в дальнейшем храниться с тем, чтобы не нарушать технологические условия в помещениях для хранения обрабатываемых продуктов.

2. При определении количества теплоты, отводимой при замораживании тел, процесс условно разбивается на три стадии: охлаждение тела от начальной температуры  $t_1$  до температуры  $t_{НЗ}$  начала замерзания жидкого раствора; отвердевание раствора, происходящее при постоянной температуре  $t_{НЗ}$ ; охлаждение уже замороженного тела от температуры начала замерзания жидкой фазы до средней конечной температуры процесса  $t_2$ . Таким образом,

$$Q_2 = G^1 \times (C_1 (t_1 - t_{НЗ}) + 335 \times \omega \times w + C_2 (t_{НЗ} - t_2))/(3,6 \times 24) \quad (4.13)$$

где  $w$  — относительное содержание влаги в продукте;  $\omega$  — относительное количество замороженной влаги в продукте при температуре конца процесса  $t_2$ ;  $C_2$  — теплоемкость замороженного продукта.

3. При домораживании тел

$$Q_2 = G^1 \times (335 \times w \times (\omega_2 - \omega_1) + C_2 (t_1 - t_2))/(3,6 \times 24) \quad (4.14)$$

где  $\omega_1$  — относительное количество замороженной влаги, соответствующее температуре  $t_1$  при которой продукт поступил на домораживание;  $\omega_2$  — то же при средней конечной температуре после домораживания.

Если процессы термической обработки производятся в устройствах периодического действия, то в выражения (4.12)—(4.14) должна быть внесена поправка в соответствии с (4.11a).

Все количество теплоты  $Q_2$  представляет собой нагрузку на компрессор, поскольку  $G^1$  является действительной производительностью предприятия по этому виду термической обработки. Для определения расчетной нагрузки на камерное оборудование отдельных помещений или аппаратов  $Q_2$  распределяется пропорционально их производительности. В устройствах периодического действия действительный теплоприток значительно изменяется в течение всего периода обработки. В начальный момент, когда теплый продукт загружается в помещение с низкой температурой, от продукта в единицу времени отнимается наибольшее количество теплоты, так как этому моменту соответствует наиболее высокая разность температур. По мере охлаждения (замораживания) продукта, разность температур между продуктом и охлаждающей средой убывает, в связи, с чем постепенно уменьшается и количество теплоты, отводимое в единицу времени. В то же время теплоприток  $Q_2$  выражениями (4.11)—(4.14) определен как средний за весь период термической обработки. Естественно, что оборудование, подобранное по среднему теплопритоку, не сможет отвести повышенное количество теплоты, выделяющееся в начале процесса. Поэтому на установках, рассчитанных подобным образом, сразу после загрузки теплых продуктов температура охлаждаемого помещения повышается, в результате чего продолжительность термической обработки оказывается существенно больше расчетной. Чтобы избежать подобных явлений, расчетный теплоприток на камерное оборудование целесообразно увеличивать на 30% по сравнению с полученным средним теплопритоком, т. е. считать  $Q_{2\text{об}} = 1,3 \times Q_2$ . Для создания более равномерной нагрузки на компрессор и приближения ее к расчетной желательно иметь несколько устройств для термической обработки (при устройствах периодического действия) со смещенными по времени циклами. В устройствах непрерывного действия

получается сравнительно равномерная нагрузка на оборудование, в связи, с чем внесение указанной поправки при их расчете производить не следует.

Термическую обработку предусматривают и при расчете холодильного оборудования помещений для хранения грузов (материалов) при низких температурах, если возможно поступление грузов, имеющих температуру выше (более чем на 3 К) температуры охлаждаемого помещения. В нагрузку на компрессор в этом случае включают теплоприток от охлаждаемых или замораживаемых грузов, вычисленный по максимальному суточному поступлению во все помещения, обслуживаемые компрессором (или компрессорами) данной температуры, кипения, так как величина общей нагрузки не зависит от того, в какое из помещений поступит груз. Для определения же камерного (местного) оборудования данного помещения весьма существенно, сколько поступит ежесуточно груза именно в него и насколько температура груза выше температуры помещения. Поэтому, например, для распределительных и производственных холодильников рекомендуется ограничивать суточное поступление грузов в камеры хранения грузовой емкостью до 200 т в количестве 8 % от емкости и в камеры хранения грузовой емкостью более 200 т — 6 % от емкости. Теплоприток от этого количества груза и принимается в расчет камерного оборудования.

#### § 4.4.

#### ТЕПЛОПРИТОК С НАРУЖНЫМ ВОЗДУХОМ ПРИ ВЕНТИЛЯЦИИ ПОМЕЩЕНИЙ

Вентиляцией, как известно, называется организованная замена воздуха помещения свежим наружным воздухом. Подаваемый в охлаждаемое помещение наружный воздух должен быть предварительно охлажден до температуры воздуха в помещении, а содержание в нем влаги понижено до значения, соответствующего влажности воздуха помещения.

Теплота, отводимая от наружного воздуха при такой его обработке, и составляет теплоприток  $Q_3$ .

Вентиляция охлаждаемых помещений обычно обуславливается:

- 1) необходимостью создания нормальных условий воздушной среды для людей, работающих в этих помещениях;
- 2) технологическими требованиями к состоянию воздушной среды.

В некоторых производственных помещениях с умеренно низкими температурами приходится работать относительно большому количеству людей. По санитарным нормам в такие помещения необходимо подавать наружный воздух из расчета  $20 \text{ м}^3/\text{ч}$  на одного работающего. Секундный теплоприток (Вт) от этого воздуха будет составлять

$$Q_3 = 20 \times n \times \rho_{\text{ПМ}} \times (i_{\text{Н}} - i_{\text{ПМ}})/3,6 \quad (4.15)$$

где  $n$  - число одновременно работающих людей в помещении;  $\rho_{\text{ПМ}}$  — плотность воздуха в охлаждаемом помещении;  $i_{\text{Н}}$  — энтальпия наружного воздуха (кДж/кг) при расчетных условиях;  $i_{\text{ПМ}}$  — энтальпия воздуха помещения.

Технологические нормы требуют вентиляции некоторых помещений (обычно с положительными температурами) для устранения запахов, удаления продуктов дыхания некоторых хранящихся грузов и т. п. В этом случае указывается необходимая кратность вентиляции, задаваемая числом, а обменов воздуха в сутки, которое означает, сколько раз в сутки воздух помещений должен быть полностью заменен свежим воздухом. Обычно кратность вентиляции, а принимают в пределах от одного до шести обменов в сутки. Тогда теплоприток от наружного воздуха может быть определен следующим образом:

$$Q_3 = V_{\text{СТР}} \times a \times \rho_{\text{ПМ}} \times (i_{\text{Н}} - i_{\text{ПМ}})/(3,6 \times 24) \quad (4.16)$$

где  $V_{\text{СТР}}$  — строительный объем вентилируемого помещения.

Теплоприток  $Q_3$  учитывается полностью и на оборудование, и на компрессор.

#### §.4.5. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ТЕПЛОПРИТОКИ ОТ РАЗЛИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Кроме перечисленных основных теплопритоков встречаются и другие теплопритоки, в частности, связанные с обслуживанием охлаждаемых помещений, с работой вентиляторов, с производством погрузочно-разгрузочных работ и т. п. В каждом конкретном случае приходится рассматривать возможные источники теплопритоков. Некоторые из них разобраны ниже.

**Теплоприток от электрического освещения  $Q_4^1$ .** Электрическая энергия, подводимая к светильникам, полностью превращается в теплоту. Поэтому, если  $N_{св}$  — мощность светильников (Вт), находящихся в охлаждаемом помещении, известна, то секундный теплоприток от освещения

$$Q_4^1 = N_{св} \quad (4.17)$$

При проектировании охлаждаемых помещений можно пользоваться нормами мощности светильников, отнесенной к  $1 \text{ м}^2$  пола помещений. Так, для производственных помещений мощность светильников составляет  $7,5 \text{ Вт на } 1 \text{ м}^2$ , для складских помещений —  $3 \text{ Вт на } 1 \text{ м}^2$ . С учетом коэффициента одновременности включения светильников, численное значение которого зависит от размеров и назначения помещения и находится в пределах  $0,3 - 1,0$ , удельный теплоприток на  $1 \text{ м}^2$   $q_4^1$  будет:

для производственных помещений  $q_4^1 = 7,5 \times 0,6 = 4,5 \text{ Вт/м}^2$ ,

для крупных складских помещений  $q_4^1 = 3,0 \times 0,35 = 1,1 \text{ Вт/м}^2$ ;

для малых холодильных, камер  $q_4^1 = 3,0 \times 1 \text{ Вт/м}^2$ .

Теплоприток для всего помещения

$$Q_4^1 = q_4^1 \times F \quad (4.17a)$$

**Теплоприток от двигателей  $Q_4^{11}$ .** В охлаждаемом помещении (аппарате) могут работать какие-либо механизмы (машины), вентиляторы в системах воздушного охлаждения, мешалки, насосы и т. п. Работа электродвигателей этих механизмов и машин в конечном итоге превращается в теплоту, которая должна быть отведена из охлаждаемого помещения.

Если электродвигатель находится в охлаждаемом помещении, то и полезная его работа, и потери в самом двигателе, превращаясь в теплоту, передаются воздуху помещения. Поэтому теплоприток (Вт) от работающего оборудования мощностью  $N_{дв}$  (кВт)

$$Q_4^{11} = \eta_{одн} \times \sum N_{дв} \times 10^3 \quad (4.18)$$

где  $\eta_{одн}$  — коэффициент одновременности работы оборудования; в зависимости от числа имеющихся двигателей и от особенностей технологического процесса  $\eta_{одн} = 0,4 - 1,0$ .

В тех случаях, когда двигатели установлены вне охлаждаемого объекта, теплоприток создается в результате превращения в теплоту только полезной работы находящегося там оборудования (конвейеров, вентиляторов, мешалок и т. п.). Тогда

$$Q_4^{11} = \eta_{одн} \times \sum N_{дв} \times \eta_{дв} \times 10^3 \quad (4.18a)$$

где  $\eta_{дв}$  — коэффициент полезного действия двигателя.

**Теплоприток  $Q_4^{111}$  от людей, работающих в помещении.** Тепловыделение одним человеком с учетом влаговыделения при средней интенсивности работы составляет около  $350 \text{ Вт}$ . Если в помещении работает  $n$  человек, то общее тепловыделение составит

$$Q_4^{111} = 350 \times n \quad (4.19)$$

**Теплоприток из смежных помещений через открытые двери  $Q_4^{1111}$ .** При открывании дверей в смежные помещения с более высокой температурой в охлаждаемое помещение попадает воздух, приносящий с собой избыточную теплоту и влагу. Точный учет этого теплопритока затруднен, вследствие чего пользуются ориентировочными данными, для удобства расчета отнесенными к  $1 \text{ м}^2$  площади пола помещения

**Таблица 4.3** Значения удельных теплопритоков через двери (Вт/м<sup>2</sup>)

Назначение помещений	Площадь помещения F, м <sup>2</sup>		
	до 50	до 150	свыше 150
Камеры охлаждения мяса	14,0	7,0	6,0
Камеры хранения охлажденных продуктов	17,5	9,3	7,0
Камеры замораживания	18,5	9,5	7,0
Камеры хранения мороженных продуктов	13,0	7,0	4,5
Экспедиции	46,5	23,0	11,5

Численные значения этих удельных теплопритоков  $q_4^{1111}$  зависят от назначения помещения (с чем связаны интенсивность грузопотока через двери и перепад температур воздуха) и от размера помещения. Относительное значение теплопритоков через двери в малое помещение больше, чем в крупное. В табл. 4.3 даны значения удельных теплопритоков  $q_4^{1111}$  (Вт/м<sup>2</sup>) через двери в некоторые помещения с высотой 3,6 м; при большей высоте помещений численные значения теплопритоков пропорционально увеличиваются. Теплоприток для всего помещения

$$Q_4^{1111} = q_4^{1111} \times F \quad (4.20)$$

**Суммирование эксплуатационных теплопритоков.** При отнесении эксплуатационных теплопритоков на компрессор приходится считаться с тем, что на предприятии эти теплопритоки не могут возникать одновременно во всех помещениях и от всех источников. Поэтому нагрузку на компрессор принимают от 50 до 75% суммы всех эксплуатационных теплопритоков, т. е.

$$Q_{4к} = (0,50 \div 0,75) \times (Q_4^I + Q_4^{II} + Q_4^{III} + Q_4^{1111}) \quad (4.21)$$

В нагрузку на камерное (местное) оборудование следует включать эксплуатационные теплопритоки полностью, поскольку в любом отдельном помещении вполне вероятно одновременное появление теплопритоков от всех этих источников, т. е.

$$Q_{4об} = Q_4^I + Q_4^{II} + Q_4^{III} + Q_4^{1111} \quad (4.22)$$

Если при проектировании трудно учесть эксплуатационные теплопритоки по их источникам, то ориентировочно можно принимать  $Q_{4об} = (0,1 \div 0,4) \times (Q_1 + Q_3)$ . Относительно большую величину эксплуатационных теплопритоков следует принимать для малых установок.

## § 4.6.

### ИТОГОВЫЕ ДАННЫЕ РАСЧЕТА ТЕПЛОПРИТОКОВ

Все данные по нагрузке на камерное (местное) оборудование от отдельных источников теплопритока суммируют для каждого отдельного помещения или аппарата

$$Q_{об} = \sum Q_{обi} \quad (4.23)$$

Эта величина является расчетной нагрузкой для определения площади теплопередающей поверхности охлаждающих приборов, которые следует установить в данном охлаждаемом помещении (аппарате).

Несколько иначе обстоит дело с нагрузкой на компрессор. Этот вид нагрузки суммируется по группам помещений или технологических аппаратов, имеющих одинаковую или близкую, обычно от  $\pm 2$  до  $\pm 3$  К температуру. Так, на пищевых предприятиях, например, все потребители холода можно разбить на следующие группы: производственные помещения с температурой от +10 до +12° С; помещения или аппараты для охлаждения продуктов, помещения для хранения охлажденных продуктов с температурами от -2 до +4° С; помещения для хранения мороженных продуктов, аппараты для производства льда с температурой от -18 до -20° С; помещения для замороженных продуктов с температурой от -25 до -30° С; помещения и аппараты для замораживания продуктов при более низких температурах, примерно до -50° С. Конечно, не на

каждом предприятии имеется вся гамма уровней температуры, но три-четыре уровня температур (изотермы) используются часто.

Еще более широкая градация уровней температуры нужна для некоторых предприятий химической промышленности. Для отвода теплоты реакций, для создания условий, при которых наиболее эффективно протекают реакции, применяются примерно такие уровни температур: получение холодной воды с температурой от +5 до +12° С, а иногда и ледяной воды с температурой от +1 до +3° С; получение хладоносителя с температурой от -18 до -25° С; охлаждение хладоносителя или непосредственное охлаждение до температуры от -40 до -50° С; получение низких температур в технологических аппаратах в интервале от -60 до -70° С; совершение технологических процессов при температуре от -90 до -100° С.

Для каждой группы помещений выбирается температура кипения, определяющая условия работы холодильной машины. Естественно, что температура кипения  $t_0$  должна быть ниже необходимой температуры  $t_{\text{ПМ}}$  в охлаждаемом помещении или в технологическом аппарате. Выбор температуры кипения определяется численным значением наименьших приведенных затрат  $Z_{\text{пр}}$  [см. выражение (3.19)]. Чем меньше разность между температурой охлаждаемой среды и температурой кипения  $\Delta t = t_{\text{ПМ}} - t_0$ , тем выше сама температура кипения и тем меньше энергетические и другие затраты  $E$  на производство холода. Однако уменьшение разности температур  $\Delta t$  увеличивает площадь поверхности охлаждающих приборов  $F_0$ , так как

$$F_0 = Q_{00} / (k_0 \times (t_{\text{ПМ}} - t_0)) \quad (4.24)$$

В этом случае повышаются капитальные затраты  $K$ , на камерное оборудование и зависящие от них амортизационные отчисления  $A$ . Повышение разности температур  $\Delta t$ , требующее более низкой температуры кипения, приводит к противоположным результатам. Для охлаждаемых помещений, в которых хранятся неупакованные пищевые продукты, от разности температур между воздухом помещения и температурой поверхности охлаждающих приборов зависит усушка хранящихся продуктов. Повышение этой разности температур, вызванное понижением температуры кипения, увеличивает усушку продуктов и стоимость потерь  $U$ . При наличии такого рода противоположных тенденций в изменении расходов по отдельным статьям возможно отыскание оптимальной разности температур  $\Delta t_{\text{опт}}$ , которой соответствует наименьшее численное значение приведенных затрат. Общий вид графического решения этой задачи показан на рис. 4.8, где по оси ординат отложены приведенные затраты, отнесенные к 1 (кВт·ч) выработанного холода.

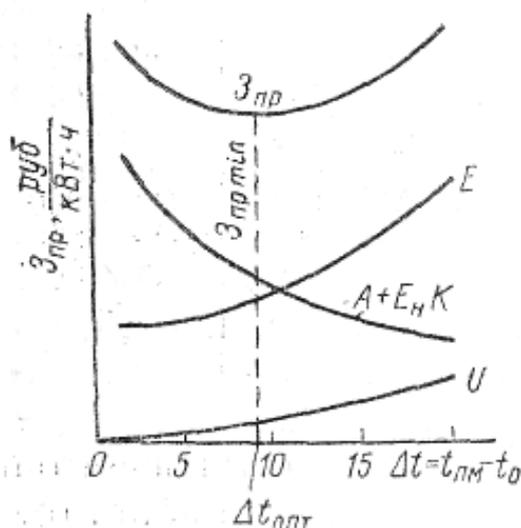


Рис. 4.8. Графическое определение оптимального перепада температур

Подобные расчеты, выполненные И. С. Бадилькесом (ВНИХИ), показали, что оптимальная разность температур  $t_{\text{ПМ}} - t_0$  в случае охлаждения воздуха лежит в пределах 7 - 10 К для батарей и 6 - 8 К для воздухоохлаждателей; в испарителях для охлаждения жидкостей эта разность температур 4—6 К. Поэтому температура кипения для систем непосредственного охлаждения

воздуха обычно равна  $t_0 = t_{\text{ПМ}} - (6 \div 10)$ ; а для охлаждения жидкостей  $t_0 = t_{\text{ПМ}} - (4 \div 6)$ ; в отдельных технологических аппаратах в целях ускорения процесса обработки она выбирается и значительно более низкой. При проектировании автоматизированных холодильников площадь поверхности охлаждающих приборов  $F_0$ , полученную по выражению (4.24), увеличивают на 20% (т. е. предусматривается работа охлаждающих приборов с коэффициентом рабочего времени  $b = 0,8$ ).

Объединение помещений и аппаратов по уровням температуры в них является, следовательно, их объединением по температурам кипения. Путем суммирования расчетных нагрузок на компрессор определяется холодильная мощность установки по каждой температуре кипения.

При выполнении приближенных расчетов теплопритоки: могут находиться по укрупненным показателям, отнесенным к  $1 \text{ м}^2$  площади помещения или к единице выпускаемой продукции. В табл. 4.4 в качестве примера приведены некоторые из таких показателей, указывающих суммарный теплоприток в различные охлаждаемые помещения.

При использовании укрупненных показателей весь расчет теплопритоков заключается в умножении удельного теплопритока на площадь помещения, т. е.  $Q = q_F \times F$ . Разумеется, такой расчет неточен, но зато он позволяет дать быстрый ответ.

**Таблица 4.4** Укрупненные показатели суммарного удельного теплопритока

Назначение охлаждаемого помещения	Температура, °С	Удельный теплоприток $q_F$ , Вт/м <sup>2</sup>	
		Одноэтажный холодильник	Многоэтажный холодильник
Хранение мороженого мяса	-20	70 - 90	45 - 65
Хранение охлажденных продуктов	от - 3 до +4	80 - 95	60 - 65
Универсальные камеры	от - 20 до 0	75 - 125	70 - 80
Замораживание продуктов	- 30	850 - 900	850 - 900
Охлаждение мяса	- 10	450 - 500	450 - 500
Хранение охлажденного мяса	От - 2 до 0	80 - 100	50 - 60
Экспедиция	+12	35	35

## Глава 3

### ИЗОЛЯЦИЯ ОХЛАЖДАЕМЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

#### § 3.1. НАЗНАЧЕНИЕ ИЗОЛЯЦИИ ОХЛАЖДАЕМЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

Устройство изолированных наружных и внутренних ограждений является важнейшей характерной особенностью строительных конструкций охлаждаемых помещений холодильных предприятий, отличающей их от аналогичных конструкций других промышленных предприятий. При строительстве холодильного предприятия на создание изоляции расходуется 25—40% стоимости всего сооружения, а на каждую тонну емкости холодильника до  $0,6 \text{ м}^3$  теплоизоляционных материалов, в связи, с чем должно быть уделено серьезное внимание правильному выбору изоляционного материала, тщательному проектированию и выполнению изоляционных конструкций ограждений. Отсутствие изоляции или ее значительное ухудшение влекут за собой невозможность поддержания в охлаждаемых помещениях нужных теплового и влажностного режимов, увеличение усушки продуктов, порчу хранящихся ценных грузов и увеличение расхода энергии на производство холода. Все это указывает на необходимость внимательного подхода к широкому кругу вопросов, относящихся к изоляции, охлаждаемых помещений.

Поскольку в охлаждаемых помещениях поддерживается температура  $t_{\text{ПМ}}$ , более низкая, чем температура окружающей наружной среды  $t_{\text{н}}$ , то между окружающей средой и охлаждаемым помещением существует перепад температур  $t_{\text{н}} - t_{\text{ПМ}}$ , а в самом ограждении — температурное

поле. Перепад температур является причиной, теплового потока через наружные ограждения внутрь охлаждаемого помещения. Плотность  $q$  этого теплового потока ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ )  $q = k_n \cdot (t_n - t_{пм}) = (t_n - t_{пм})/R_n$  (3.1)

где  $R_n$  — термическое сопротивление наружного ограждения,  $\text{м}^2\text{К}/\text{Вт}$ .

Так как температура наружного воздуха обычно значительно выше температуры воздуха охлаждаемого помещения, то и содержание влаги в наружном воздухе оказывается больше, чем содержание влаги в воздухе охлаждаемого помещения. В результате возникает перепад влажностей, или перепад парциальных давлений (упругости) водяного пара  $p_n - p_{пм}$  по обеим сторонам ограждения, и влажностное поле (поле упругости водяного пара) внутри ограждения. Наличие этого перепада давлений вызывает поток водяного пара, который диффундирует через ограждение (рис. 3.1) внутрь охлаждаемого помещения, и плотность  $w$  этого потока в  $\text{кг}/(\text{м}^2\text{с})$

$$w = (p_n - p_{пм})/H_n \quad (3.2)$$

где  $H_n$  — сопротивление ограждения паропрооницанию,  $\text{м}^2\text{сПа}/\text{кг}$ .

Полностью прекратить потоки теплоты и водяного пара при наличии  $\Delta t$  и  $\Delta p$  невозможно, так как это потребовало бы выполнения ограждений с бесконечно большими сопротивлениями теплопередаче и паропрооницанию.

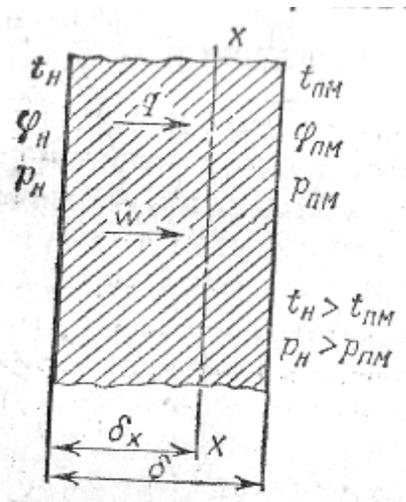


Рис. 3.1. Элемент однородного ограждения охлаждаемого помещения

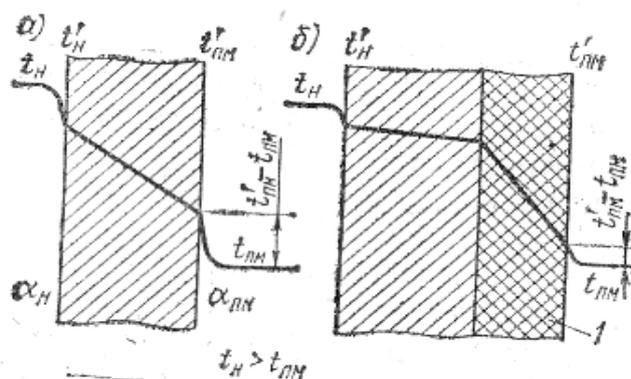


Рис. 3.2. Уменьшение разности температур у поверхностей изолированного ограждения по сравнению с неизолированным

Однако, увеличивая в рациональных пределах указанные сопротивления, можно существенно уменьшить проникновение теплоты и водяного пара. Эта задача и выполняется с помощью изоляции, которая представляет собой элемент ограждения помещений или производственного оборудования, обладающий значительным сопротивлением прохождению теплоты и влаги и вследствие этого существенно уменьшающий их проникновение через ограждения.

Проникающие в охлаждаемое помещение теплота и влага в тепловом отношении приводят к одному и тому же результату: увеличению тепловой нагрузки на холодильное оборудование, установленное в охлаждаемом объекте. Следовательно, изоляция, уменьшая теплопритоки и влагопритоки, способствует уменьшению расхода энергии на холодильную установку при поддержании заданного режима в охлаждаемом объекте.

Так как для испарения влаги с поверхности продуктов, находящихся в охлаждаемом помещении, необходимо подводить теплоту, то уменьшение теплопритока в помещение способствует сокращению усушки продуктов. Д. Г. Рютов (ВНИХИ) показал, что каждый килоджоуль количества теплоты, проникшей в помещение с температурой  $-18^{\circ}\text{C}$ , где хранятся неупакованные пищевые продукты, вызывает испарение (т. е. усушку) примерно 0,036 г влаги с их поверхности (а при  $-10^{\circ}\text{C}$  — около 0,062 г на 1 кДж). Таким образом, изоляция, уменьшая теплопритоки, способствует более длительному сохранению высокого качества продуктов, хранящихся в охлаждаемом помещении.

Значение тепловой изоляции еще и в том, что ее наличие позволяет приблизить температуру внутренней поверхности ограждения к температуре внутри помещения и тем самым значительно уменьшить разность температур  $t'_{\text{пм}}$  и  $t_{\text{пм}}$  (рис. 3.2). Плотность теплового потока, проходящего через ограждение, по условию стационарности равна не только  $(t_{\text{н}}-t_{\text{пм}})/R_{\text{н}}$ , но и

$$q = \alpha_{\text{пм}}*(t'_{\text{пм}}-t_{\text{пм}}) = (t'_{\text{пм}}-t_{\text{пм}})/R_{\text{пм}} \quad (3.3)$$

где  $\alpha_{\text{пм}}$  — коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности ограждения к воздуху помещения;  $R_{\text{пм}}$  — термическое сопротивление теплоотдачи от этой поверхности.

Тогда

$$(t_{\text{н}}-t_{\text{пм}})/R_{\text{н}} = (t'_{\text{пм}}-t_{\text{пм}})/R_{\text{пм}} \\ t'_{\text{пм}}-t_{\text{пм}} = R_{\text{пм}}*(t_{\text{н}}-t_{\text{пм}})/R_{\text{н}} \quad (3.4)$$

Как видно из выражения (3.4), при заданных  $t_{\text{н}}$  и  $t_{\text{пм}}$  и при неизменном термическом сопротивлении теплоотдачи  $R_{\text{пм}}$  разность температур  $t'_{\text{пм}}-t_{\text{пм}}$  обратно пропорциональна общему термическому сопротивлению ограждений. Поэтому на рис. 3.2, б, где показано ограждение, изолированное слоем теплоизоляционного материала 1, разность температур у поверхностей ограждений значительно меньше, чем у поверхностей того же ограждения, но не изолированного (рис. 3.2, а). Большая разность температур между внутренней поверхностью и воздухом в помещении создает усиленную циркуляцию воздуха у ограждений и повышенную усушку грузов, хранящихся вблизи ограждений, а также может привести или к отеплению этих грузов в летнее время, или к подмораживанию в зимнее время при  $t_{\text{н}} < t_{\text{пм}}$ . Подмораживание грузов также может быть при недостаточной изоляции внутренних ограждений, отделяющих низкотемпературные помещения от помещений, в которых хранятся охлажденные продукты при более высоких температурах. Большая разность температур на поверхностях ограждений может быть причиной конденсации влаги на поверхности с теплой стороны, поскольку возможно понижение температуры именно этой поверхности ниже температуры точки росы окружающего воздуха.

В соответствии с задачами, стоящими перед холодильной изоляцией, можно считать, что изоляция представляет собой единство (сочетание) теплоизоляционного материала, пароизоляционного (гидроизоляционного) материала и изоляционной конструкции. В связи с этим необходимо ознакомиться с каждой из этих трех составляющих изоляции холодильных сооружений.

## § 3.2.

### СВОЙСТВА ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Изоляция ограждений холодильных сооружений оказывается в трудных условиях прежде всего из-за непрерывных изменений температуры и влажности наружного воздуха, переменного

воздействия солнечной радиации и ветра. Потоки теплоты и влаги не только меняются по величине, но иногда (при относительно высоких температурах в помещениях) и по направлению. Особенностью работы холодильной изоляции является возможность конденсации водяного пара па поверхностях ограждения или внутри изоляции, а в некоторых случаях и замерзания выпавшей влаги. В этих условиях необходимо, чтобы теплоизоляционные материалы не только имели хорошие первоначальные свойства, но и по возможности сохраняли их в условиях длительной эксплуатации. По этой причине теплоизоляционные материалы должны обладать определенными свойствами, позволяющими изолированным ограждениям успешно выполнять свои функции в течение значительного срока.

1. Основное свойство, которым должен обладать теплоизоляционный материал, — это низкая способность проводить теплоту, характеризуемая соответственно малой величиной коэффициента теплопроводности  $\lambda$  Вт/(мК). В определенной степени указанное свойство предполагает малую объемную массу материала  $\rho_{об}$  (кг/м<sup>3</sup>). Связь между двумя этими величинами объясняется тем, что характерной особенностью структуры теплоизоляционных материалов является высокая пористость. Можно сказать, что каждый теплоизоляционный материал состоит из каркаса твердого вещества, образующего оболочку пор (ячеек, капилляров), и воздуха (или другого газа), заполняющего объем пор. В связи с такой неоднородностью структуры теплоизоляционных материалов характеристикой их массы является не плотность, а объемная масса, представляющая собой массу единицы объема системы.

Если обозначить через  $\rho$  плотность оболочки пор изоляционного материала и пренебречь массой газа в порах материала по сравнению с массой каркаса, то можно написать  $V_{мат} \cdot \rho_{об} = V_{кар} \cdot \rho$ . Тогда относительная доля  $M$  объема каркаса  $V_{кар}$  в общем объеме материала  $V_{мат}$  будет  $M = V_{кар} / V_{мат} = \rho_{об} / \rho$ , а пористость  $\Pi$  или относительный объем пор в материале может быть определен по выражению  $\Pi = 1 - M = 1 - (\rho_{об} / \rho)$  или  $\Pi = (\rho - \rho_{об}) / \rho$ . Основанием для сделанного допущения является то, что плотность структуры минералов составляет 2400—3000 кг/м<sup>3</sup>, органических материалов 1450—1650 кг/м<sup>3</sup>, а плотность газов при атмосферных условиях 1—2 кг/м<sup>3</sup>. Теплоизоляционных материалов колеблется от 50% у материалов с относительно высокой объемной массой до 99% у материалов с низкой объемной массой.

Благодаря пористой структуре изоляционных материалов их коэффициент теплопроводности определяется соотношением между количеством воздуха (или газа) внутри пор, обладающего весьма низким коэффициентом теплопроводности, и вещества в твердой оболочке. Так, сухой неподвижный воздух при 0° С имеет коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0,023$  Вт/(мК), у газообразной двуокиси углерода  $\lambda = 0,014$  Вт/(мК), у перегретого пара хладагента-11  $\lambda = 0,008$  Вт/(мК), а хладагента-12  $\lambda = 0,009$  Вт/(мК); коэффициент теплопроводности оболочек пор находится в интервале от 2,3—5,8 Вт/(мК) для естественных минералов и растительных волокон до 10,5—419 Вт/(мК) для металлов. Коэффициент теплопроводности материалов, применяемых для тепловой изоляции, в зависимости от вышеуказанного соотношения находится в пределах 0,015—0,35 Вт/(мК).

В применении к пористым теплоизоляционным материалам, термин коэффициент теплопроводности носит условный, т. е. эквивалентный характер, так как в них наблюдается не только чистая теплопроводность, как в однородных твердых телах. В действительности в пористых телах передача теплоты осуществляется всеми тремя способами: теплопроводностью, конвекцией и лучеиспусканием. Передача теплоты теплопроводностью происходит главным образом по материалам каркаса, в то время как в конвективном обмене участвует газ, заключенный внутри пор, а радиационный теплообмен осуществляется между поверхностями пор. Существенную роль в общем, процессе передачи теплоты в пористых телах играет конвективный теплообмен. Его относительное значение возрастает для пор большего размера. Как видно из табл. 3.1, при росте диаметра пор до 0,5 и даже до 1 мм не

## Условный коэффициент теплопроводности воздуха (Вт/(мК)) в зависимости от размера пор

Температура, °С	Диаметр пор, мм					
	0	0,1	0,5	1,0	2,0	3,0
0	0,0233	0,0241	0,0257	0,0277	0,0317	0,0440
100	0,0306	0,0316	0,0357	0,0408	0,0511	0,0819

происходит значительного увеличения коэффициента теплопроводности; при наличии в материале пер до 3 мм коэффициент теплопроводности воздуха вырастает почти в два раза. Конвекция усиливается, если поры соединяются друг с другом, образуя сквозные каналы, в которых создается высокая подвижность воздуха. Поэтому менее теплопроводны материалы с мелкими замкнутыми порами, В то же время такие материалы могут характеризоваться относительно высокой долей радиационного теплообмена.

Неодинаковостью структуры некоторых материалов в разных направлениях объясняется анизотропность этих материалов. Так, теплопроводность дерева вдоль волокон почти вдвое больше, чем поперек волокон. При очень мелких порах материал по своей структуре приближается к однородному телу, в этом случае теплопроводность по оболочкам приобретает большое значение. Это означает, что материалы должны иметь свои оптимальные размеры пор и оптимальную объемную массу, которым соответствует минимальный для данного материала коэффициент теплопроводности. Такого рода закономерность наблюдается, например, при укладке сыпучих или волокнистых материалов при различной степени их уплотнения. Если материал уложен недостаточно плотно, то возрастает конвективный и радиационный теплообмен, что приводит к повышению теплопроводности.

Влиянием конвекции и лучеиспускания в процессе передачи теплоты через теплоизоляционный материал объясняется возрастание коэффициента теплопроводности  $\lambda$  с повышением температуры. На это указывают и данные табл. 3.1, по которым можно судить и о том, что в крупных порах теплопроводность воздуха растет при повышении температуры значительно быстрее. Повышение температуры вызывает и рост радиационного теплообмена, поскольку излучение пропорционально четвертой степени абсолютной температуры. Однако, как следует из опытных данных, коэффициент теплопроводности теплоизоляционных материалов находится примерно в линейной зависимости от температуры, т. е.

$$\lambda_i = \lambda_0 \cdot (1 + b \cdot t) \quad (3.5)$$

где  $\lambda_0$  — коэффициент теплопроводности при 0°С;  $b$  — температурный коэффициент теплопроводности материала, К<sup>-1</sup>.

Коэффициент  $b$  для различных материалов имеет величину  $(2-4) \cdot 10^{-3}$  К<sup>-1</sup>, а потому теплопроводность теплоизоляционных материалов соответственно изменяется от 20 до 40% на каждые 100 К повышения или понижения температуры. Для низкотемпературных установок это свойство материалов оказывается весьма положительным.

2. Теплоизоляционные материалы должны обладать малой гигроскопичностью и малым водопоглощением. *Гигроскопичностью* называется свойство материалов поглощать (сорбировать) водяной пар, а *водопоглощением* — поглощать капельно-жидкую воду. Этими свойствами различные материалы обладают в разной степени, но в результате их проявления влажность материалов возрастает.

Влажность материала характеризуется содержанием в нем свободной, т. е. химически не связанной воды. Численное значение влажности зависит от выбора количественной единицы измерения. Различают массовую и объемную влажность материала. Массовая влажность может быть отнесена к массе сухого или к массе влажного материала.

Экспериментально влажность определяют высушиванием навески материала массой не менее 5 г в сушильном шкафу при температуре 105—110° С. Длительность высушивания определяют периодическим взвешиванием навески. При достижении образцом постоянной массы его высушивание прекращают.

Если массу образца влажного материала до сушки обозначить через  $g_{м.в}$ , а массу образца после высушивания — через  $g_{м.с}$ , то масса влаги  $g_v$ , содержащейся в материале, окажется  $g_v = g_{м.в} - g_{м.с}$ . Массовая влажность  $x$ , отнесенная к массе сухого материала,

$$x = g_v / g_{м.с} = (g_{м.в} - g_{м.с}) / g_{м.с}$$

а массовая влажность  $\xi$ , отнесенная к массе влажного материала,

$$\xi = g_v / g_{м.в} = (g_{м.в} - g_{м.с}) / g_{м.в} \quad (3.7)$$

Для пересчета из одного вида задания влажности в другой выражение (3.6) можно представить в виде  $x = g_v / (g_{м.в} - g_v)$  и разделить числитель и знаменатель дроби на  $g_{м.в}$ . Тогда,

$$x = \xi / (1 - \xi) \text{ и } \xi = x / (1 + x).$$

Из выражения (3.7) следует, что  $\xi$  может изменяться в пределах от 0 до 1, а  $x$ , как это следует из формулы пересчета, ограничен пределами 0 и  $\infty$ . Для сопоставления приведены значения влажности, отнесенной к массе сухого материала, соответствующие некоторым величинам влажности, отнесенной к массе влажного материала,

$$\xi, \% \quad \dots\dots \quad 0 \quad 25 \quad 50 \quad 75 \quad 100$$

$$x, \% \quad \dots\dots \quad 0 \quad 33 \quad 100 \quad 300 \quad \infty$$

*Объемной влажностью* материала называется отношение объема влаги, содержащейся в образце материала, к объему самого образца. В этом определении вся влага независимо от того, в каком агрегатном состоянии она находится в материале, считается по объему капельной водой. Кроме того, предполагается, что при поглощении воды объем материала не изменяется.

Объем ( $m^3$ ), занимаемый влагой в материале,  $V_v = g_v / \rho_v = g_v / 1000$ , а объем, занимаемый образцом материала,  $V_m = g_{м.с} / \rho_{об.м.с}$

Тогда объемная влажность

$$w = V_v / V_m = g_v \cdot \rho_{об.м.с} / (1000 g_{м.с}) = x \cdot \rho_{об.м.с} / 1000 \quad (3.8)$$

Из выражения (3.8) следует, что численное значение объемной влажности  $w$  для материалов с объемной массой до  $1000 \text{ кг}/m^3$  всегда меньше численного значения массовой влажности  $x$  и что разница между этими величинами тем больше, чем легче материал.

Поглощение влаги материалом ведет прежде всего к ухудшению тепловых свойств материала. Объясняется это тем, что вода может занимать в материале часть объема ячеек и пор, вытесняя из них газ. Так как теплопроводность воды  $\lambda_w = 0,58 \text{ (Вт/мК)}$  примерно в 25 раз больше теплопроводности неподвижного воздуха, то наличие воды в материале вызывает существенное повышение теплопроводности теплоизоляционного материала. При низких температурах вода в порах материала может замерзнуть, что приведет к еще большему возрастанию теплопроводности материала, так как теплопроводность льда  $\lambda_l = 2,2 \text{ Вт/(мК)}$  почти в 100 раз больше теплопроводности неподвижного воздуха.

Зависимость теплопроводности материала от объемной влажности может быть выражена эмпирической формулой

$$\lambda_s = \lambda_{с.м} + \Delta\lambda \cdot w$$

где  $\lambda_{с.м}$  — коэффициент теплопроводности материала в воздушно-сухом состоянии.  $\Delta\lambda$  — приращение коэффициента теплопроводности на каждый процент увеличения объемной влажности;  $w$  — объемная влажность, %.

Величину  $\Delta\lambda$  органических материалов при положительных температурах принимают равной  $3,5 \cdot 10^{-3}$ , а при отрицательных температурах  $4 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(мК)}$ ; неорганических материалов — соответственно  $2,3 \cdot 10^{-3}$  и  $3,5 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(мК)}$ .

Содержащий влагу изоляционный материал может подвергаться гниению, в нем могут образовываться грибки и плесени, что приводит к разрушению материала и сокращению срока его службы.

3. Теплоизоляционные материалы должны быть температуростойкими и морозостойкими. Это значит, что материалы не должны становиться хрупкими при низких температурах и, кроме того, должны сохранять прочность и эластичность каркаса, подвергаясь многократному замораживанию и оттаиванию в увлажненном состоянии, т. е. при наличии воды в порах. Увеличение объема воды при ее замерзании в порах материала не должно вызывать образования трещин в материале или его разрушения.

4. Теплоизоляционные материалы должны быть негорючими или обладать возможно меньшей горючестью.

5. Теплоизоляционные материалы должны быть химически инертными по отношению к материалам, с которыми они могут контактировать в изоляционной конструкции, например не вызывать коррозию стальных стенок аппарата, на наружную поверхность которого наложен теплоизоляционный слой данного материала.

6. Теплоизоляционные материалы не должны иметь запаха или воспринимать запахи. Это качество существенно для пищевых предприятий, поскольку многие скоропортящиеся пищевые продукты легко воспринимают различные запахи, что ухудшает их потребительское качество. Некоторые же продукты (например, рыба) сами обладают запахом, который может быть воспринят теплоизоляционным материалом и передан другим продуктам, которые будут затем храниться в охлаждаемом помещении.

7. Теплоизоляционные материалы должны обладать способностью противостоять грызунам и не должны привлекать их. Грызуны не только портят изоляцию и хранящиеся продукты, но и способствуют распространению заразных заболеваний.

8. Теплоизоляционные материалы должны обладать достаточной механической прочностью, чтобы выдерживать воздействия, неизбежные во время транспортировки, укладки и в процессе эксплуатации (нагрузка от продуктов, удары, вибрации).

9. Теплоизоляционные материалы должны легко обрабатываться (разрезаться, пилиться и т. д.) обычными режущими инструментами.

10. Теплоизоляционные материалы должны обладать удовлетворительными экономическими показателями. При прочих удовлетворительных свойствах высокая стоимость материала или его малые ресурсы ограничивают возможности применения такого материала.

Материалов, обладающих в равной и полной степени всеми перечисленными свойствами, пока не существует. Поэтому выбор теплоизоляционных материалов производится не только с учетом их положительных и отрицательных качеств, но иногда и реальной возможности получения материала на месте строительства, а также в зависимости от значения и назначения объекта.

Правильному выбору материалов для тепловой изоляции помогает классификация их по отдельным характерным признакам. Теплоизоляционные материалы следует классифицировать прежде всего по их тепловой эффективности, т. е. по величинам коэффициента теплопроводности и объемной массы. По этому признаку теплоизоляционные материалы можно разбить на четыре группы:

1) высокоэффективные материалы с коэффициентом теплопроводности в сухом состоянии до  $0,045 \text{ Вт/(мК)}$  и с объемной массой до  $100 \text{ кг/м}^3$ ;

2) эффективные материалы с коэффициентом теплопроводности от  $0,045$  до  $0,080 \text{ Вт/(мК)}$  и с объемной массой  $100\text{—}350 \text{ кг/м}^3$ ;

3) материалы средней эффективности с коэффициентом теплопроводности от  $0,080$  до  $0,180 \text{ Вт/(мК)}$  и с объемной массой  $350\text{—}650 \text{ кг/м}^3$ ;

3) материалы низкой эффективности с коэффициентом теплопроводности от  $0,18$  до  $0,35 \text{ Вт/(мК)}$  и с объемной массой  $650 - 1000 \text{ кг/м}^3$ .

Собственно теплоизоляционными материалами являются материалы первых трех групп и они главным образом находят применение в холодильном строительстве. Материалы четвертой группы относятся к сравнительно легким строительным материалам, а в качестве теплоизоляционных используются только в том случае, если это местные материалы и если расчетом доказано, что их применение для изоляции более экономично, чем материалов первых групп.

Внутри каждой из указанных групп материалы могут классифицироваться и по другим признакам. По происхождению или по исходному сырью материалы делятся на две группы: органического и неорганического происхождения (минералы, металлы). В каждой, из групп материалы могут быть естественными или искусственными. Материалы органического происхождения, за исключением некоторых искусственных, как правило, гигроскопичны и влагоемки, вследствие чего они могут гнить, плесневеть. В большинстве случаев они горючи.

Следует учитывать и температурную область, внутри которой может быть применен данный теплоизоляционный материал. По этому признаку все материалы можно разделить на две группы.

1. Материалы для низких температур (область отрицательных температур и до  $+80^\circ \text{ C}$ ). В области низких температур некоторые материалы становятся хрупкими. У верхнего температурного

предела может происходить изменение структуры и механических свойств ряда материалов в результате размягчения вязущих связок (битума, смол), обугливания органических веществ и т. п.

2. Материалы для высоких температур (от 80° С и примерно до 500° С) находят применение на теплоэлектростанциях, промышленных тепловых установках, тепловых коммуникациях. Для этого температурного интервала используются главным образом материалы неорганического происхождения.

По внешнему виду или способу применения в изоляционной конструкции теплоизоляционные материалы классифицируются на такие группы.

1. Штучные жесткие изделия, имеющие определенные размеры и форму; при выполнении изоляционных работ форму таких изделий обычно не изменяют. Для изоляции плоских поверхностей они могут быть в виде плит, блоков и кирпичей. Для изоляции криволинейных поверхностей (сосудов цилиндрической формы, трубопроводов) штучные жесткие изделия изготавливают в виде сегментов, брусков с трапециевидным сечением, скорлуп (полуцилиндрических оболочек). Производятся и изделия сложной конфигурации, предназначенные для изоляции фасонных частей трубопроводов (вентилей, тройников, угольников и т. п.).

2. Штучные гибкие изделия, имеющие определенные размеры, но форму этих изделий можно в некоторой степени изменять. Они производятся в виде матов, листов, рулонов и шнура. Такие изделия используются для изоляции как плоских, так и криволинейных поверхностей.

3. Сыпучие или засыпные материалы, представляющие собой рыхлую бесформенную массу с произвольным расположением частиц. Материалы могут быть зернистого строения (зерна, опилки), порошкообразного и волокнистого (нити, волокна). Они могут применяться для изоляции поверхностей любой формы; при проведении изоляционных работ материал засыпается между двумя стенками, одной из которых является изолируемая поверхность, а другая, вспомогательная, отстоит от нее на размер необходимой толщины теплоизоляционного слоя и повторяет форму изолируемой поверхности или выполняется более простой формы.

4. Материалы, которые в конечном виде получают в самом процессе выполнения теплоизоляционных работ, например напылением на изолируемую поверхность или заливкой исходной смеси и изолируемое пространство. Благодаря такой технологии получения, теплоизоляционного слоя они могут применяться для изоляции поверхностей любой конфигурации, даже очень сложной. Высокоэффективные материалы благодаря своей малой объемной массе находят применение прежде всего в транспортных и других передвижных установках, в устройствах и аппаратах, для которых на первое место выдвигается требование минимальной массы. Так как материалы этой группы обладают малой тепловой инерцией (малым коэффициентом теплоусвоения), их успешно применяют в установках с переменным тепловым режимом (низкотемпературные испытательные камеры, регенеративные теплообменники в криогенных установках). В связи с возрастающим в последние годы производством материалов из искусственных смол с хорошими показателями они находят все большее применение на крупных промышленных установках. Большинство высокоэффективных материалов имеет малую механическую прочность. Материалы данной группы можно разделить на несколько подгрупп.

3. Органические естественные материалы. К ним относятся различные породы растительных волосков или растительного пуха, находившие ранее применение, но теперь редко используемые.

4. Органические искусственные материалы. Очень перспективными материалами этой подгруппы являются пенопласты, получаемые путем вспенивания синтетических смол. Пенопласты имеют мелкие замкнутые поры и этим отличаются от поропластов — тоже вспененных пластмасс, но имеющих соединяющиеся (незамкнутые) поры и потому не используемых в качестве теплоизоляционных материалов. В зависимости от рецептуры и характера технологического процесса изготовления пенопласты могут быть жесткими, полужесткими и эластичными с порами необходимого размера; изделиям могут быть приданы желаемые свойства (например, уменьшена горючесть).

Пенопласты делятся на термопластичные, или термообратимые, размягчающиеся при повторных нагреваниях, и термонепластичные, или термонеобратимые, отвердевающие при первом цикле нагревания и не размягчающиеся при повторных нагреваниях; к первым относятся пенополистиролы (ПС) и пенополивинилхлориды (ПХВ), ко вторым — пенополиуретаны (ПУ), а

также материалы на основе фенолоформальдегидных (ФФ), эпоксидных (Э) и кремнийорганических (К) смол.

По виду технологического процесса производства пенопласты делятся на формуемые (получаемые прессовым методом) и на вспенивающиеся в конструкции (получаемые беспрессовым методом). При прессовом методе порошкообразный полимер с добавленным к нему твердым газообразователем (порофором) прессуется в пресс-формах на гидравлическом прессе под давлением 10—20 МПа и при нагревании до 150—175° С; при этом пластмасса плавится, а газообразователь разлагается. В полученной после прессования заготовке газ находится под большим давлением и может диффундировать во внешнюю среду; по этой причине заготовки хранят не больше 1—2 суток. В качестве газообразователя применяют бикарбонат натрия, карбонат аммония, выделяющие двуокись углерода, а также некоторые вещества, выделяющие азот. Из заготовок получают плиты и другие изделия путем нагревания заготовок в формах до высокоэластичного состояния (100—120° С); в этих условиях газ выделяется и вспенивает пластмассу, образуя поры. По этому способу производят изделия из термопластичных пластмасс марок ПС-1, ПС-4, ПХВ-1, ПХВ-2. Они имеют коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0,030-0,045$  Вт/(мК) при объемной массе 40-80 кг/м<sup>3</sup>.

Беспрессовый способ имеет две основные разновидности. По одной из них получают наиболее легкие пенополистиролы. В качестве газообразователей здесь применяют легкокипящие жидкости (изопентан, хлористый метилен, хладоны), которыми насыщают в автоклавах гранулы полимера (зерна диаметром 0,2—0,5 мм) под давлением. Гранулы можно засыпать в формы (для получения плит и других изделий) или в пространство между двумя стенками изолируемого объема аппарата, конструкции. При последующем нагревании (водяным паром в поле тока высокой частоты) до высокоэластичного состояния гранулы вспениваются, расширяясь примерно в десять раз благодаря выделению газа, и склеиваются между собой. Так производят, например, плиты и скорлупы одного из распространенных пенопластов ПСБ — пенополистирола беспрессового, имеющего  $\lambda = 0,030-0,035$  Вт/(мК) при объемной массе  $\rho_{об} = 25-35$  кг/м<sup>3</sup>; он горит коптящим пламенем. Отечественная промышленность выпускает и самозатухающий пенопласт ПСБ-С.

По другой разновидности беспрессового способа получают пенополиуретан. Газообразование в этом методе происходит при смешении в жидком состоянии двух частей композиции во время заливания их в изолируемый объем (например, между двумя стенками конструкции ограждения) или во время нанесения (набрызгиванием, напылением) теплоизоляционного слоя на изолируемую поверхность. Объем исходной смеси при этом увеличивается в 30—40 раз. Напыление смеси производят пульверизатором (пистолетом-распылителем), что делает этот способ высокопроизводительным и наиболее технологичным, особенно при изоляции сложных конструкций (например, корпуса суднаохладильника). За один проход образуется слой толщиной 15—25 мм. Пенополиуретан наносится на поверхность любого материала и хорошо приклеивается к ней. В месте прилегания к изолируемой поверхности образуется плотная пленка, обладающая пароизоляционными свойствами. Наибольшую прочность образовавшийся теплоизоляционный слой приобретает через 24 ч после напыления. Коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0,035-0,040$  Вт/(мК) при объемной массе 50—60 кг/м<sup>3</sup>. При заливании частей композиции в изолируемый объем в качестве пенообразователя нередко применяют хладон-11 или хладон-12. В этом случае коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0,019-0,021$  Вт/(мК).

Пенопласты имеют, по данным изготовителей, малую гигроскопичность (1—2%) и малое водопоглощение (до 20%), хотя при проверке ПСБ-С после нескольких лет работы в ограждении холодильника были получены более высокие значения. Предел прочности на сжатие 15—50 Н/см<sup>2</sup>. К пенопластам может быть отнесена и мипора, известная также под названиями твердая пена, ипорка, находившая применение и малых установках. Это белоснежный мелкопористый материал, получаемый из смеси формальдегида и искусственной мочевины с добавкой пенообразующих веществ при температуре около 95°С. Изготавливается в виде блоков объемной массой 15—25 кг/м<sup>3</sup>. Однако мипора имеет высокое водопоглощение (до 500%), очень низкую механическую прочность, она горюча и при ее горении выделяются ядовитые газы, при увлажнении быстро гнивет.

3. Неорганические материалы. Представителем этой подгруппы является алюминиевая фольга (альфоль). Для тепловой изоляции используют фольгу толщиной 7—20 мкм. Она применяется в виде гофрированных (мятых) листов с деревянными рамками (иногда листы наклеиваются на

картон), уложенных с образованием воздушных прослоек толщиной 8—10 мм обычно до десяти рядов. Объемная масса гофрированной фольги 6—8 кг/м<sup>3</sup>, но из-за наличия конструктивных элементов для крепления листов и образования зазоров между листами объемная масса изоляции возрастает и доходит до 100 кг/м<sup>3</sup>. Достоинством этого материала является высокая отражательная способность, уменьшающая радиационный теплообмен, что особенно заметно при высоких температурах.

Другими важными представителями подгруппы неорганических материалов являются искусственные волокна: минеральная, шлаковая и стеклянная вата. Сырьем для минеральной ваты служат горные породы (мергели, доломиты, базальты и др.), для шлаковой — доменный шлак, а для стеклянной ваты — материалы, из которых получают различные виды стекла (кварцевый песок, известь, сода). Исходную шихту расплавляют в вагранках или в ваннах, печах. Для получения волокон из расплава чаще применяется фильерно-дутьевой способ, в котором расплав поступает сначала в платиновый питатель, имеющий большое число фильерных отверстий (диаметром 1,8 мм), а вытекающие из них струйки расплава разбиваются струей водяного пара или горячего воздуха, выходящей из сопла со скоростью до 600 м/с, на мелкие шарики, которые вытягиваются на лету в нити. Средняя толщина минеральной ваты 6—7 мкм. Вата марки 100 имеет объемную массу 100 кг/м<sup>3</sup> и коэффициент теплопроводности 0,045 Вт/(мК), а вата марки 150 —  $\rho_{об} = 150$  кг/м<sup>3</sup> и  $\lambda = 0,047$  Вт/(м К). Стекловолокно обычное теплоизоляционное имеет толщину нитей 12—35 мкм и его показатели аналогичны минеральной вате. Выпускается и ультратонкое волокно (УТВ) с диаметром нити около 1 мкм; оно при  $\rho_{об} = 5 - 6$  кг/м<sup>3</sup> имеет  $\lambda = 0,031$  Вт/(мК). Минеральная и стеклянная вата могут применяться как засыпной материал, но дают большую усадку. Нагрузка на них не должна превышать 0,2 Н/см<sup>2</sup>. Эти материалы не горючи, не проходимы для грызунов. Они имеют малую гигроскопичность (не больше 2%), но большое водопоглощение (до 600%). При выполнении изоляционных работ необходимо применять защитные меры.

Более удобными для применения оказываются изделия из искусственных волокон, в частности минераловатный войлок на синтетической связке с объемной массой не более 100 кг/м<sup>3</sup> и коэффициентом теплопроводности 0,043—0,047 Вт/(мК). Минераловатный войлок на битумной связке выпускается марок 100, 150 и 250 соответственно его объемной массе.

В эту же подгруппу включается губчатая резина (оназот), изготавливаемая на основе синтетического каучука. Из нее производят, эластичные плиты и скорлупы путем вспенивания расплавленной каучуковой массы азотом или двуокисью углерода под давлением. Одновременно осуществляют вулканизацию каучука. Материал мало гигроскопичен и водоустойчив; благодаря своей эластичности пригоден для изоляции труб и цилиндрических аппаратов. При  $\rho_{об} = 60 - 100$  кг/м<sup>3</sup> имеет  $\lambda = 0,035 - 0,050$  Вт/(мК).

В криогенных установках для тепловой защиты оборудования применяются порошковые материалы и различные виды вакуумной изоляции. Распространенным порошковым материалом является аэрогель — порошкообразный высокопористый материал, состоящий в основном из химически чистого двуоксида кремния. Его характеризует низкая теплопроводность, более низкая, чем у спокойного воздуха. Объясняется это тем, что диаметр пор аэрогеля ( $1,8 \cdot 10^{-7}$  мм) значительно меньше длины свободного пробега молекул воздуха ( $1 \cdot 10^{-4}$  мм при 0,1 МПа), в силу чего колебания молекул воздуха в порах уменьшаются и интенсивность конвективного теплообмена резко снижается. Аэрогель имеет объемную массу 80—100 кг/м<sup>3</sup> и коэффициент теплопроводности 0,021 — 0,023 Вт/(мК). При увлажнении аэрогеля происходят необратимые его изменения, а потому он должен тщательно защищаться от проникновения влаги. (Обычно его засыпают в герметичный объем между двумя металлическими стенками. Различают три вида вакуумной изоляции. Первый из них называется порошково-вакуумной изоляцией. Отличается он от порошковой тем, что в объеме куда засыпан аэрогель (или другой порошковый материал), создается разрежение; при остаточном давлении 1,33 Па ( $1 \cdot 10^{-2}$  мм рт. ст.) коэффициент теплопроводности аэрогеля будет в десять раз меньше, чем у воздуха в нормальных условиях, т. е.  $0,23 \cdot 10^{-3}$  Вт/(мК). Вторым видом такой изоляции является вакуумная изоляция. В этом случае в пространстве между двумя герметичными стенками, ограждающими изолируемый аппарат, создается необходимое разрежение; так, тот же коэффициент теплопроводности  $0,23 \cdot 10^{-3}$  Вт/(мК) достигается при остаточном давлении  $1,33 \cdot 10^{-3}$  Па ( $1 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст.). Третий вид вакуумной изоляции называется слоисто-вакуумной изоляцией; она состоит из чередующихся слоев тонкого

стекловолокна и листов алюминиевой фольги. На 1 см толщины изоляции приходится от 20 до 30 слоев. Тот же коэффициент теплопроводности достигается при остаточном давлении  $1,33 \cdot 10^{-2}$  Па ( $1 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст.) и  $0^\circ\text{C}$ . При криогенных температурах коэффициент теплопроводности такой изоляции уменьшается еще в десятки раз.

Эффективные материалы широко применяются в промышленном строительстве для изоляции ограждений аппаратов и трубопроводов. Материалы этой группы разбиваются на подгруппы.

1. Органические естественные материалы. К ним прежде всего следует отнести пробку, получаемую из коры пробкового дуба и родственного ему бархатного дерева. Кора этих деревьев обладает высокопористой структурой. Так, в  $1 \text{ см}^3$  пробки оказывается до 1 млн. пор диаметром  $25\text{—}40$  мкм. Стенки пор пропитаны смолистым веществом — суберином, которое делает их водонепроницаемыми. Для нужд тепловой изоляции идут отходы пробочного производства, которые дробятся на крошку с зернами различной величины. Пробковая крошка применяется иногда в качестве засыпной изоляции. Из крошки прессованием изготавливают плиты и скорлупы. Пробковые изделия выпускаются двух видов. Первый вид — обыкновенную пробку — получают прессованием с добавлением связок (битума, клея) и последующей сушкой при  $150^\circ\text{C}$ . Она имеет светло-коричневый цвет и объемную массу  $280\text{—}350 \text{ кг/м}^3$ . Лучший вид пробки — экспанзит — получают прессованием и сушкой без доступа воздуха при температуре до  $300^\circ\text{C}$  и без добавления вяжущих веществ. При таком нагревании пробковая крошка разбухает и из нее выделяются продукты сухой перегонки пробки, которые склеивают отдельные зерна. Получается материал с меньшей объемной массой ( $200\text{—}280 \text{ кг/м}^3$ ), темного цвета и с запахом горелого. Экспанзит менее гигроскопичен, чем обыкновенная пробка, меньше подвергается гниению и более долговечен. Пробка — хороший материал, но далеко не идеальный. Она горюча, имеет немалую объемную массу, подвергается гниению, разрушается грызунами. Пробка является ограниченно доступным материалом. Современные пенопласты по многим показателям превосходят пробку.

Широкое применение в холодильном строительстве имели изделия из торфа-сфагнома (мало разложившиеся верхние слои болотного мха). Из торфа производят штучные изделия, главным образом торфоплиты. Коэффициент теплопроводности торфоплит  $0,058\text{—}0,081 \text{ Вт/(мК)}$  при объемной массе  $170\text{—}275 \text{ кг/м}^3$ . Торфоплиты делятся на изготовленные сухим и мокрым способом, причем плиты, изготовленные мокрым способом, по качеству выше. Торфоплиты имеют много недостатков. Они обладают существенным водопоглощением (до  $180\%$ ), склонны к гниению и образованию плесеней, горючи, причем способны тлеть без доступа воздуха (непропитанные плиты), так как содержат кислород в количестве, достаточном для горения. В связи с этим торфоплиты находят теперь ограниченное применение.

К материалам этой группы относятся также изделия из древесины или отходы от обработки древесины, которые являются менее теплопроводными, чем сама древесина. Это древесные опилки и стружка, имеющие объемную массу  $120\text{—}150 \text{ кг/м}^3$ . Изготавливают теплоизоляционные материалы и из продуктов переработки древесины, например теплоизоляционные древесноволокнистые плиты, бумажная литая изоляция (бумлитиз). Сюда же могут быть отнесены такие теперь малоиспользуемые материалы, как гофрированный картон и гофрированная бумага.

2. Неорганические искусственные материалы. Материалы этой группы представляют большой интерес для холодильного строительства, так как им в значительно меньшей степени присущи существенные недостатки органических материалов. К ним относятся прежде всего изделия из стеклянной и минеральной ваты. Из стеклянной ваты изготавливают маты и полосы, которые сверху и снизу покрывают корочкой толщиной около  $1,5$  мм, образованной волокнами, проклеенными клеящим веществом. Корочка предохраняет изделие при перевозке и монтаже. Маты и полосы прошивают нитками из стеклянного волокна или тонкой стальной проволокой. Из минеральной и шлаковой ваты производят такие распространенные теплоизоляционные материалы, как полужесткие и жесткие минераловатные плиты. Они сходны по технологии производства, но различаются содержанием битума, связывающего волокна. В полужестких плитах от  $8$  до  $20\%$  битума. К волокнам ваты подмешивается расплавленный тугоплавкий битум, и образующиеся маты подпрессовываются и подсушиваются. Из матов вырезают плиты размером  $1000 \times 500$  мм. Марки полужестких плит  $250$ ,  $300$ ,  $350$  и  $400$  соответствуют их объемной массе; коэффициент теплопроводности  $0,065\text{—}0,080 \text{ Вт/(мК)}$ . Выпускаются также полужесткие и жесткие минераловатные плиты на синтетической связке из фенольных смол. Они имеют меньшую объемную массу ( $150\text{—}175 \text{ кг/м}^3$ ) и коэффициент теплопроводности  $0,051\text{—}0,054 \text{ Вт/(мК)}$ .

Другим материалом этой группы являются асбовермикулитовые плиты, изготавливаемые из вспученного вермикулита (60%), асбестовых волокон (20%) и битумной эмульсии (20%). Их объемная масса  $250 \text{ кг/м}^3$ , коэффициент теплопроводности  $0,075—0,085 \text{ Вт/(мК)}$ . Они морозостойки и огнестойки, а потому находят применение главным образом для устройства противопожарных поясов в ограждениях холодильников.

Теплоизоляционные материалы средней эффективности также находят большое применение в промышленном холодильном строительстве. К ним можно отнести главным образом неорганические искусственные материалы. Наиболее распространенным материалом этой группы является пенобетон, являющийся искусственным камнем. Пенобетон часто изготавливают непосредственно на месте строительства. Для его производства цементное молоко смешивают с мыльной пеной. Цементное молоко представляет собой смесь цемента с водой (суспензию), своеобразную тем, что часть воды вступает с цементом в химическую реакцию гидратации (до 15% воды от массы цемента). Мыльная пена взбивается, например, из канифольного мыла, растворяемого в воде, до образования мелких ячеек. Для стойкости пены в процессе схватывания цемента в нее добавляют столярный клей. Получается так называемая мыльноклеевая эмульсия. При смешении цементного молока со взбитой пеной цементное молоко обволакивает каждую ячейку мыльной пены тонкой оболочкой, смесь выливают в формы или в опалубку, где происходит твердение пенобетона и испарение избыточной воды. Более устойчивые виды пенобетона получают при твердении в искусственно созданных условиях. Так называемый пропаренный пенобетон после наполнения форм помещается на 15—20 ч в паровую камеру — в атмосферу насыщенного пара без избыточного давления. Лучший вид пенобетона — автоклавный — получается при твердении пенобетона в автоклавах. Такой пенобетон производят только на специальных заводах и применяют как конструкционный изоляционный материал. Объемная масса термоизоляционного пенобетона от  $300$  до  $500 \text{ кг/м}^3$ , коэффициент теплопроводности от  $0,08$  до  $0,15 \text{ Вт/(мК)}$ . Изготавливается он в виде блоков. Пенобетон не горюч, мало гигроскопичен (до 8% по массе), имеет малое водопоглощение (до 35%), не гниет, не привлекает грызунов. Недостатком его является структурная нестабильность. При неблагоприятных условиях он покрывается трещинами и даже разрушается. Наибольшее применение пенобетон находит для выполнения внутренних стен; в случае изоляции наружных ограждений холодильников он целесообразен только для помещений нулевых и положительных температур.

Другим материалом этой группы является пеностекло (газостекло), предложенное проф. И. И. Китайгородским. Его производят из отходов стекольного производства и боя стекла. Тонко размолотый бой стекла смешивают с газообразователем (древесным углем, известняком и др.), засыпают в формы и нагревают в печи до спекания стекломассы. При температуре  $700—800^\circ \text{C}$ , когда стекло размягчается, газообразующие вещества, разлагаясь, выделяют двуокись углерода, которая равномерно вспучивает вязкую стеклянную массу. Объемная масса пеностекла  $200 - 600 \text{ кг/м}^3$ , коэффициент теплопроводности  $0,06—0,017 \text{ Вт/(мК)}$ . Его гигроскопичность (2—3%) и водопоглощение (5%) невелики. Пеностекло не горит, не гниет, не привлекает грызунов, его механическая прочность высокая (предел прочности на сжатие  $300—500 \text{ Н/см}^2$ ). Изготавливают пеностекло в виде блоков.

К материалам этой группы относятся шлаки, являющиеся остатками от сжигания каменного угля в топках (топливные), а также отходами при доменном процессе (доменные). Их применяют как засыпные материалы, чаще всего для изоляции полов, лежащих на грунте.

Лучшим является доменный шлак, применяемый в виде крупных зерен-гранул. Гранулированный шлак получают при выпуске доменного шлака под воду. Его объемная масса от  $500$  до  $900 \text{ кг/м}^3$ , коэффициент теплопроводности  $0,16—0,25 \text{ Вт/(мК)}$ . Теплоизоляционные материалы низкой эффективности включают такие материалы, которые используются главным образом как строительные, но могут выполнять также функции тепловой изоляции.

1. Органические естественные материалы. К ним относится древесина различной породы.
2. Неорганические естественные материалы. В эту подгруппу включаются естественные легкие камни: арктический туф, известняки, ракушечник, пемза.
3. Неорганические искусственные материалы. К ним относятся легкие, или теплые бетоны. Легкими называются бетоны, в которых в качестве крупного инертного заполнителя применены такие сравнительно легкие материалы, как шлак, пемза и др. В соответствии с видом заполнителя эти бетоны носят название шлакобетон, пемзобетон и т. п.

Таким образом, имеется большое количество теплоизоляционных материалов, из которых может осуществляться выбор в соответствии с назначением холодильной установки, с местными условиями строительства.

### § 3.3.

#### СВОЙСТВА ПАРОВО- И ГИДРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Как говорилось ранее, наличие градиента упругости водяного пара, содержащегося в окружающей среде и в охлаждаемом помещении, вызывает поток пара через ограждение. Кроме того, в ряде случаев возможно поступление влаги в ограждение при соприкосновении капельной воды с материалами. Так, в ограждение может проникать влага из грунта, влага атмосферных осадков, что требует выполнения гидрозащиты материалов, из которых сделаны ограждения.

Защита от проникновения парообразной и капельной влаги выполняется материалами, одновременно являющимися паро- и гидроизоляционными. Пароизоляционные материалы должны отвечать следующим требованиям,

1. Иметь высокое сопротивление паропроонианию, что характеризуется малым коэффициентом паропроонируемости материала.

Количество влаги (кг/с), проникающее через однородное ограждение путем паропроониания,

$$W = (\mu/\delta)(p_n - p_{пм})F, \quad (3.9)$$

где  $\mu$  — коэффициент паропроонируемости материала;  $\delta$  — толщина ограждения

Коэффициент  $\mu$ , представляет собой количество водяного пара (кг), проникающее в 1 с через 1 м<sup>2</sup> ограждения толщиной в 1 м при разности парциальных давлений пара по сторонам ограждения в 1 Па. Для пароизоляционных материалов он имеет величину порядка  $1 \cdot 10^{-11}$  кг/(м<sup>2</sup>·с·Па). Сопротивление паропроонианию слоя однородного материала (м<sup>2</sup>·с·Па/кг)  $H = \mu/\delta$ .

2. Не поглощать влагу, что предупреждает гниение материалов и обеспечивает их долговечность.

3. Быть температуроустойчивыми, т. е. не быть хрупкими при низких температурах и не размягчаться при температурах, соответствующих верхней границе рабочего температурного интервала.

4. Не иметь запаха.

Основным пароизоляционным материалом является битум (асфальтовый гудрон), который находит и самостоятельное применение и является важнейшей составляющей многих пароизоляционных материалов. Встречаются природные битумы, но в основном битумы получают искусственным путем в виде жидких и твердых остатков при перегонке нефти. Твердые нефтяные битумы (БН) выпускаются нескольких марок, различающихся главным образом по температуре размягчения; под ней понимают температуру, при которой битум переходит из твердого состояния в пластично-текучее. Битумы, имеющие температуру размягчения, до 50 °С, называются *легкоплавкими*, а выше 50° С — *тугоплавкими*. Другой характеристикой битумов, определяющей их вязкость, является пенетрация (проникновение); мерой пенетрации считают глубину в десятых долях миллиметра, на которую проникает в вязкое тело игла с грузом в 100 г в течение 5 мин при температуре испытуемого материала 25° С. В холодильном строительстве применяют главным образом нефтяные битумы последних трех-четырех марок (табл. 3.2).

Коэффициент теплопроводности битума 0,30—0,35 Вт/(мК)

Как видно из таблицы, битумы с более высокой температурой размягчения оказываются значительно менее вязкими, что вызывает трудности при нанесении пароизоляционного слоя. Битум БН-III размягчается от прямых солнечных лучей, а БН-V — растрескивается при низких температурах. Для теплоизоляционных и пароизоляционных работ чаще всего используют битум БН-IV.

Марка битума	БН-III	БН-IV	БН-V	БН-VK
Температура размягчения, °С	45	70	90	90
Пенетрация, 10 <sup>-1</sup> мм	40 - 70	21 - 40	5 - 20	20
Температура вспышки, °С	200	230	230	230
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1000	1000	1000	1000

Для создания нужных свойств нередко применяют композиции из битумов двух марок, в частности БН-III и БН-V, в равных долях.

По способу производства пароизоляционных работ пароизоляционные материалы могут быть окрасочные (обмазочные) и оклеечные. Битум относится к окрасочным материалам. Его наносят на поверхность в расплавленном состоянии щетками (кистями) вручную, в один или несколько слоев общей толщиной от 1 до 5 мм. Для расплавления битум разогревают в баках до температуры 160—170° С, применяя электрический подогрев, и поддерживают эту температуру во время работы. Наносить битум следует только на сухую и чистую поверхность, что задерживает выполнение изоляционных работ. Делаются попытки наносить расплавленный битум при помощи пульверизаторов.

Более производительным способом, позволяющим создать пароизоляционный слой более высокого качества, оказывается окраска поверхности битумной эмульсией или битумной мастикой. Битумная эмульсия представляет собой мелкодисперсные частицы битума, находящиеся в воде во взвешенном состоянии. В состав эмульсии входят эмульгаторы (мыло, некоторые сорта глины и др.), обволакивающие поверхности частиц битума тонкой оболочкой и тем самым препятствующие слипанию их в крупные частицы. Для образования эмульсии битум в расплавленном состоянии дробится в воду на частицы размером около 5 мкм в центрифугах при большой скорости вращения или в ультразвуковых диспергаторах. В составе эмульсии 50% воды, 48% битума, 1,5% эмульгатора и 0,5% щелочи. Эмульсию наносят на поверхность разбрызгиванием из пульверизатора (пистолета-распылителя). После испарения воды частицы битума слипаются в сплошную ровную пленку. После высыхания первого слоя можно наносить следующий (до трех-четырех слоев). Эмульсия может наноситься и на влажную поверхность. Недостатком битумных слоев является недостаточная эластичность, из-за чего при низких температурах на битуме появляются волосные трещины, значительно увеличивающие паропроницаемость слоя. Для придания эластичности и морозостойкости слоям битумной эмульсии в нее добавляют латекс (водная эмульсия в данном случае синтетического каучука).

Широкое применение находят битумные мастики. Они встречаются двух разновидностей: горячие (твердые) и холодные (пластичные). В обоих случаях мастики представляют собой смесь битума с наполнителями, придающими мастикам эластичность. В качестве наполнителей применяют волокнистые материалы (асбест) и пылевидные материалы (мелкий или молотый песок, известь и др.). Для приготовления горячих мастик расплавленный битум (80—85%) смешивают с различными наполнителями, желательно и с волокнистыми, и с пылевидными. Для придания пластичности в мастику добавляют соляровое масло и латекс. Горячие мастики можно применять в качестве обмазочной пароизоляции, а также приклеивающего слоя для гидроизоляции из битумных рулонных материалов, а также для покрытия кровель но бескровным рулонным материалам. При проведении работ мастику расплавляют при температуре 120—180° С и наносят на поверхность или вручную, или механическим распылением. При механизированном нанесении пароизоляционного слоя увеличиваются плотность, долговечность и адгезионные свойства пароизоляции, а трудовые затраты уменьшаются в 5—10 раз.

Холодная мастика состоит из битумной эмульсии (50%), асбестовых волокон (25%) и песка (25%). На поверхности ее наносят также, как штукатурку, слоем 5—10 мм. Мастика может наноситься и на холодные, и на влажные поверхности. Особенно целесообразно ее применение в качестве пароизоляционного материала для пароизоляции холодных трубопроводов.

К оклеечным пароизоляционным материалам относятся различные битумные и не битумные рулонные и листовые материалы.

1. Битумные материалы с органической основой. Такими материалами являются пергамин и рубероид. Пергамин — это кровельный картон, пропитанный легкоплавким битумом с толщиной листов 0,5—0,7 мм. Рубероид — кровельный картон, пропитанный легкоплавким битумом и с одной или с двух сторон покрытый слоем тугоплавкого битума, в связи с чем рубероид называют покровным рулонным материалом, а пергамин — беспокровным. Толщина рубероида 1,5 мм. Для внутренней пароизоляции нельзя применять толь, так как он представляет собой кровельный картон, пропитанным каменноугольными дегтепродуктами, которые обладают сильным запахом. В связи с этим в холодильном строительстве толь применяют только как наружный гидроизоляционный или кровельный материал. Недостатком этих материалов является возможность гниения их основы и вследствие этого уменьшение долговечности пароизоляционного слоя. В связи с этим материалы с гниющей основой должны применяться главным образом для небольших установок и неответственных сооружений.

2. Материалы с неорганической (негниющей) основой. К ним относятся гидроизол, фольгоизол, стеклоизол, стеклорубероид. Гидроизол — это беспокровный рулонный материал, изготовленный путем пропитки асбестового картона битумами. Толщина листов около 1 мм. При изготовлении фольгоизола алюминиевая фольга толщиной 0,2—0,3 мм покрывается с одной стороны битумно-резиновым составом. Толщина листов до 4 мм. Стеклорубероид и стеклоизол имеют одинаковую основу — стекловолокнистую ткань, но стеклорубероид получают нанесением на ткань битума, а стекло-изол — битумно-резиновой массы. Толщина листов 2—3 мм.

3. Безосновные материалы. К ним относятся изол и бризол, которые изготавливают прокатыванием через вальцы смеси нефтяных битумов с наполнителем (асбестовые волокна и тальк) и с дробленой старой резиной. Выпускаются толщиной 2,0 мм, шириной 450 мм (бризол) и 800—1000 мм (изол). Их отличает высокая пластичность при низких температурах.

Материалы последних двух групп обладают высокой паронепроницаемостью, водостойкостью долговечностью и применяются в ответственных сооружениях. Для пароизоляции применяются и небитумные материалы, в частности полимерные пленочные материалы, например полиэтиленовые и поливинилхлоридные пленки (толщиной 0,2 мм). Их недостатком является быстрое старение и трудность наклеивания. Лучшие результаты дает применение дублированных пленок типа пленка—бумага или пленка—фольга—бумага. Хорошим средством защиты изоляции от увлажнения является облицовка поверхности стен глазурованными плитками. Идеальными пароизоляционными материалами являются металлы, которые приходится использовать в низкотемпературных малых установках. Для сопоставления величин коэффициентов паропроницаемости строительных, тепло- и пароизоляционных материалов в табл. 3.3 приведены эти данные для некоторых материалов.

Для приклеивания неполимерных теплоизоляционных материалов и пароизоляционных материалов к изолируемым поверхностям применяют расплавленную горячую битумную мастику. Но для приклеивания полимерных материалов она не годится из-за высокой температуры расплавления, при которой происходят необратимые изменения этих материалов. Для приклеивания пенополистирола и синтетических пленок используют или битумную мастику с температурой расплавления 70—80° С, или клеи. Температуру размягчения битумной мастики понижают добавлением органических растворителей (бензина, керосина, толуола и др.); отверждение мастики происходит при испарении растворителя. Находят применение и различные клеи, такие, как клей КБ 3 на основе фенолоформальдегидной смолы, мастика ДФК-П на основе дифенолкетоновых смол, мастика КН-2, латексный клей и клей СП-1 на основе синтетических каучуков.

**Таблица 3.3**      **Коэффициенты паропроницаемости некоторых материалов**

	Коэффициент паропроницаемости
--	-------------------------------

Материалы	$10^{12}$ кг / (м.с.Па)	$10^4$ г / (м.ч. мм рт. ст.)
<i>Строительные</i>		
Бетон	8,4	40,0
Кирпич	29,3	140,0
Штукатурка известковая	37,6	180,0
Штукатурка цементная	20,9	100,0
<i>Теплоизоляционные</i>		
Дерево (сосна) перпендикулярно волокнам	17,1	82,0
Минераловатные плиты	94,1	450,0
Стекловолоконная вата	135,9	650,0
Пенобетон	73,2	350,0
Пенополистирол	13,6	65,0
Пенополиуретан	6,3	30,0
<i>Пароизоляционные</i>		
Алюминиевая фольга	0,0015	0,0072
Битум	0,2400	1,1500
Бризол, изол	0,3450	1,6500
Полиэтиленовая пленка	0,0056	0,027
Рубероид	0,3760	1,8000

### § 3.4.

## УВЛАЖНЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ В ОГРАЖДЕНИЯХ ХОЛОДИЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ И БОРЬБА С ЭТИМ ЯВЛЕНИЕМ

Увлажнение изоляционных материалов в ограждениях на некоторых действующих холодильных предприятиях нередко является причиной резкого ухудшения работы холодильной установки. Поэтому борьба с увлажнением материалов в ограждениях всегда должна быть объектом внимания и проектировщика, и эксплуатационника.

подавляющее большинство теплоизоляционных материалов поглощает как парообразную, так и капельную воду, и поэтому в обычных условиях они являются влажными. Это связано прежде всего со структурой самих материалов, являющихся капиллярно-пористыми коллоидными телами. Коллоидные тела относятся к мелкодисперсным двухфазным системам. Благодаря большой раздробленности частицы твердой фазы имеют весьма развитую поверхность. В теплоизоляционных материалах частицы дисперсной фазы связаны между собой и образуют более или менее жесткие пространственные структуры - сетки или каркасы, являющиеся оболочками пор и капилляров в материале. При изменении температуры и содержания влаги такие тела изменяют свои физические свойства в степени, зависящей от характера связи материалов с поглощенной жидкостью.

По классификации академика П. А. Ребиндера, все формы связи капиллярно-пористых тел с поглощенной влагой делятся на три большие группы: 1) химическая связь; 2) физико-химическая; 3) физико-механическая. Химическая связь характеризуется наибольшей прочностью и совершенно точными соотношениями между количествами сухого материала и присоединенной влаги, не изменяющимися при изменении внешних условий. Присоединение воды происходит в процессах гидратации и кристаллизации (образование кристаллогидратов). Химически связанная влага не удаляется даже при нагревании материала до 120—150° С.

Формам физико-химической связи свойственны различные, но определенные соотношения между количествами сухого материала и влаги, соответствующие условиям внешней среды. Из форм физико-химической связи наибольшее значение имеет адсорбционно-связанная влага (гигроскопическая влага). Поступление гигроскопической влаги в материал и ее продвижение в материале происходит в парообразном состоянии.

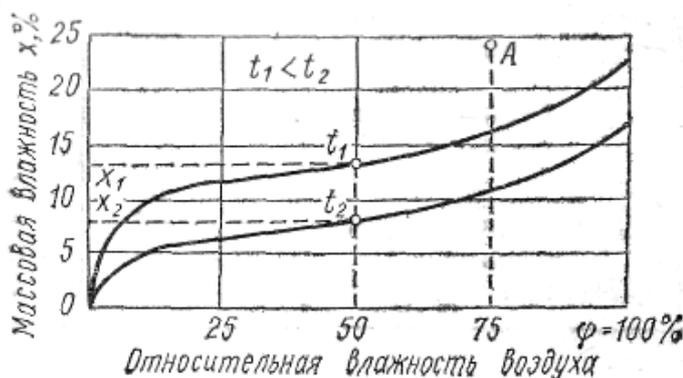
Формы физико-механической связи еще менее прочные, и им соответствуют неопределенные соотношения между количествами сухого материала и поглощенной воды, которые, однако, могут

иметь предельные значения. Поглощение влаги при таких формах связи происходит при непосредственном соприкосновении материала с капельной влагой. Влагой в формах физико-механической связи являются капиллярная влага, перемещающаяся в микро- ( $r < 0,1$  мкм) и в макрокапиллярах ( $r > 0,1$  мкм), а также влага смачивания, удерживаемая в порах материалов в результате прилипания воды к стенкам оболочек пор. Обе формы физико-механической связи вызваны наличием поверхностного натяжения у жидкостей.

Каждой последующей форме связи влаги с материалом соответствует все возрастающее содержание влаги. Если поступление влаги в материал продолжается, то появляется вода, не имеющая никакой связи с материалом — физически свободная, которая носит название гравитационной влаги, так как она перемещается в материале под действием гравитационных сил и, следовательно, только в одном направлении. Количество водяного пара, которое может сорбировать (поглощать) тот или иной материал, характеризует его гигроскопичность. Этой способностью разные материалы обладают в различной степени.

Адсорбция водяного пара поверхностью частиц оболочек происходит под действием электромолекулярных сил притяжения между молекулами материала и водяного пара. В результате частицы материала покрываются тонкой жидкостной пленкой, толщиной в одну (мономолекулярный слой) или несколько молекул (полимолекулярный слой). Значительные величины электромолекулярных сил притяжения способствуют тому, что частицы воды в пленке, окружающей частицы твердой фазы, находятся под давлением сотен и тысяч мегапаскалей. При большом давлении, под которым находится гигроскопическая влага, температура замерзания этой воды значительно понижается. Часть гигроскопической влаги не замерзает даже при  $-80^{\circ}\text{C}$ .

Если сухой материал находится некоторое время в атмосфере влажного воздуха, то он адсорбирует из воздуха водяной пар в совершенно определенном (для данного материала) количестве, зависящем от состояния воздуха. Видимое поглощение пара из воздуха прекращается при достижении подвижного равновесия между влажным воздухом и влажным материалом. При равновесии давление насыщенного пара над поверхностью водяной пленки в материале оказывается равным парциальному давлению водяного пара в окружающем влажном воздухе. Содержание влаги в материале в состоянии равновесия приобретает некоторое постоянное значение, называемое *равновесной гигроскопической влажностью* или *равновесной влажностью материала*. Материалы, имеющие значительную равновесную влажность, называются *гигроскопичными*. Равновесную влажность материалов определяют опытным путем после выдержки (в течение 1 сут) образцов в атмосфере влажного воздуха различной установленной влажности. Результаты опытов изображаются графически в виде кривых равновесной влажности или изотерм сорбции влаги (рис. 3.3), поскольку процесс сорбции обычно исследуется при постоянной температуре. Ордината любой точки кривой дает величину равновесной влажности



**Рис. 3.3.** Характер изотерм сорбции влаги теплоизоляционным материалом

материала, соответствующей данной влажности воздуха. Равновесная влажность материала, отвечающая насыщенному воздуху, называется *максимальной гигроскопической влажностью*. Область в диаграмме выше кривой равновесной влажности является областью капиллярной влажности. Если, например, при  $t_1$  и влажности воздуха  $\varphi = 75\%$  материал имеет влажность, определяемую ординатой точки A, то можно утверждать, что в материале имеется еще и

капиллярная влага. Равновесная влажность материала убывает с повышением температуры ( $x_2 < x_1$ ).

Для иллюстрации в табл. 3.4 приведены величины равновесной влажности некоторых органических и неорганических материалов в интервале температур 0—35° С. Данные таблицы подтверждают высокую гигроскопичность материалов органического происхождения по сравнению с неорганическими материалами.

Так как материалы все время находятся в атмосфере влажного воздуха, то гигроскопичные материалы всегда оказываются влажными, т. е. содержат влагу в количестве, определяемом величиной равновесной влажности (воздушно-сухой материал). По этой причине при выполнении расчетов нельзя пользоваться данными для коэффициентов теплопроводности материалов в сухом состоянии, так как материалы всегда содержат некоторое количество влаги, что иногда существенно увеличивает коэффициент теплопроводности.

Материал, который содержит влагу в количестве, превышающем равновесную влажность, называют *увлажненным*. С явлением увлажнения изоляции можно и нужно бороться. Максимальное количество связанной влаги, какое может содержать материал, обычно значительно выше максимальной гигроскопической влажности и определяется величиной влагопоглощения, зависящей от структуры оболочек материала (пор, капилляров) и от смачиваемости жидкостью его частиц (прилипания).

Чаще всего увлажнение материалов в изоляционных конструкциях ограждений, т. е. появление физико-механически связанной воды, начинается с конденсации внутри ограждения водяного пара, диффундирующего через ограждение под действием разности парциальных давлений. Конденсация пара происходит тогда, когда перегретый пар на пути движения встречает слои ограждения с температурой, при которой пар становится насыщенным. Возможность конденсации влаги в ограждении может быть выяснена расчётным путем. В расчете предполагается стационарность как потока теплоты, так и потока влаги. Для решения задачи сначала следует установить характер изменения температуры и парциального давления водяного пара внутри ограждения.

**Таблица 3.4 Равновесная влажность некоторых материалов**

Материал	Объемная масса в сухом состоянии Роб. м. с кг/м <sup>3</sup>	Влажность материала при относительной влажности воздуха			
		φ = 50%		φ = 100%	
		массовая x, %	объемная w, %	массовая x, %	объемная w, %
<i>Неорганические материалы</i>					
Кирпич красный	1700	0,07	0,12	0,53	0,90
Стекланная вата	130	0,09	0,012	0,60	0,078
Минеральноватные плиты	350	0,30	0,11	1,90	0,67
Пенобетон	350	3,05	1,05	8,30	2,86
<i>Органические материалы</i>					
Дерево (сосна)	350	10,2	5,60	31,3	17,20
Пробковые плиты	200	5,2	1,04	14,1	2,82
Торфоплиты	225	10,9	2,43	28,4	6,40
Мипора	20	10,0	0,20	35,5	0,71

Как известно, в любом сечении  $x$  (рис. 3.1) находится из условия стационарности теплового потока

температура сечения  $x$  —

$$q = (t_n - t_{nm})/R_n = (t_n - t_x)/R_x \quad (3.1a)$$

где  $R_x$  — термическое сопротивление ограждения на пути теплового потока до сечения  $x-x$ .

Тогда

$$t_x = t_n - (R_x/R_n) * (t_n - t_{nm}) \quad (3.10)$$

Подобно этому условие стационарности потока влаги будет

$$w = (p_n - p_{nm})/H_n = (p_n - p_x)/H_x \quad (3.2a)$$

где  $H_x$  сопротивление паропроницанию ограждения на участке до сечения  $x-x$ .

Отсюда парциальное давление пара: в сечении  $x-x$

$$p_x = p_n - (H_x/H_n) * (p_n - p_x) \quad \text{или} \quad p_x = p_n - w H_x \quad (3.11)$$

Уравнение (3.11) показывает, что при прохождении водяного пара по ограждению его парциальное давление понижается от  $p_n$  до  $p_x$  в результате преодоления сопротивления ограждения паропроницанию. Если пренебречь величиной сопротивления влагоперехода от воздуха к поверхности ограждения, имея в виду его небольшую величину, то для однородной стенки уравнение может быть написано следующим образом:

$$p_x = p_n - (w/\mu)\delta_x \quad (3.11a)$$

Пренебрежение сопротивлением влагопереходу позволяет принимать парциальное давление пара на наружной поверхности ограждения равным давлению пара в воздухе, соприкасающемся с данной поверхностью, т. е.  $p_n$ .

Из последней зависимости можно заключить, что падение парциального давления пара в однородном ограждении происходит по линейному закону (прямая линия в координатах  $p-\delta$ ). Кроме того, видно, что падение давления происходит интенсивнее при прохождении потока большей величины и в материалах, обладающих меньшим коэффициентом паропроницаемости.

Знание температуры  $t_x$  в слое  $x-x$  и парциального давления пара  $p_x$  позволяет найти влажность воздуха и в этом слое  $\varphi_x = p_x/p''_x$  и соответствующую равновесную влажность материала. Результаты расчета могут быть показаны на графиках  $t-\delta$  и  $p-\delta$ . Поскольку уравнение для  $t_x$  позволяет определить температуру в каждом слое ограждения, то по этим значениям температур могут быть найдены и соответствующие давления насыщенного водяного пара  $p''_x$  в слоях ограждения. Так как изменение температуры по толщине однородного ограждения происходит по линейному закону, то изменение давления будет соответствовать логарифмическому закону связи между давлением и температурой насыщенного пара.

При построении такой диаграммы могут встретиться два случая. Первый случай изображен на рис. 3.4, а для однородного ограждения и на рис. 3.4, б — для неоднородного. Его особенность заключается в том, что линия парциального давления  $p_x$  проходит ниже линии  $p''_x$  и нигде с ней не пересекается. Это значит, что водяной пар в ограждении нигде не становится насыщенным и, следовательно, конденсации влаги в ограждении не происходит. В данном случае увлажнение изоляции не угрожает. Линия  $\varphi_x = f(\delta_x)$  протекает с наличием максимума там, где больше всего сближаются линии  $p_x$  и  $p''_x$ . Характерным является то, что максимум влажности воздуха и, следовательно, влажности (например, массовой —  $x$ ) материала оказывается вблизи от холодной поверхности ограждения, но не у самой холодной поверхности.

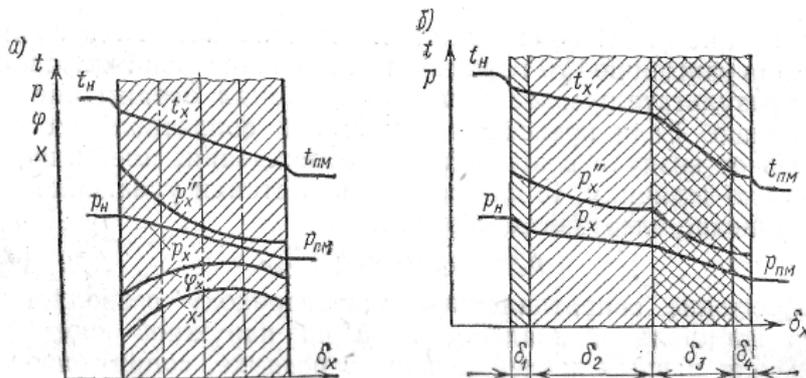


Рис. 3.4. Изменение температуры и упругости пара в ограждении

Такое же построение может быть выполнено и для неоднородного ограждения, состоящего из нескольких материалов с различным паропроницанием. В многослойном ограждении парциальное давление пара в различных слоях падает с неодинаковой скоростью, вследствие чего в плоскостях соприкосновения слоев различных материалов прямые  $p_x = f(\delta_x)$  получают переломы, образуя ломаную линию [см. и линию  $t_x = f(\delta_x)$ ].

Особенностью второго случая оказывается пересечение линий  $p_x$  и  $p''_x$  (рис. 3.5, а), т. е. на некоторых участках ограждения пар, диффундирующий через ограждение, становится насыщенным, что вызывает его частичную конденсацию внутри ограждения. Часть толщины ограждения, где происходит конденсация пара, называется *зоной конденсации*. Было бы неверно считать зоной конденсации участок  $a - b$  между точками пересечения линий  $p_x$  и  $p''_x$  прежде всего потому, что отрезок  $ab$  прямой  $de$  теперь неправильно характеризует давление пара. Дело в том, что не существует пара, который бы имел давление выше, чем давление насыщенного пара того же вещества при той же температуре. Это значит, что в зоне конденсации пар должен иметь давление, равное давлению насыщенного пара, т. е. изменять свое состояние по линии  $acb$ . Линия  $dacbe$  не может быть графиком изменения давления пара в однородном ограждении, так как в точках  $a$  и  $b$  появились резкие изменения линий (переломы), что характерно только для неоднородных (многослойных) ограждений. Поскольку плавный переход от прямой линии к кривой может быть осуществлен только по касательной, то действительным графиком падения давления пара в ограждении может быть линия  $afcge$ , которая состоит из отрезков касательных  $df$  и  $ge$ , проведенных из точек  $d$  и  $e$ , к линии  $p''_x = f(\delta_x)$ , и участка  $fcg$  самой линии  $p''_x = f(\delta_x)$  между точками касания  $fug$ . Последний участок ширины ограждения  $fcg$  и является действительной зоной конденсации. Графический метод нахождения зоны конденсации прост

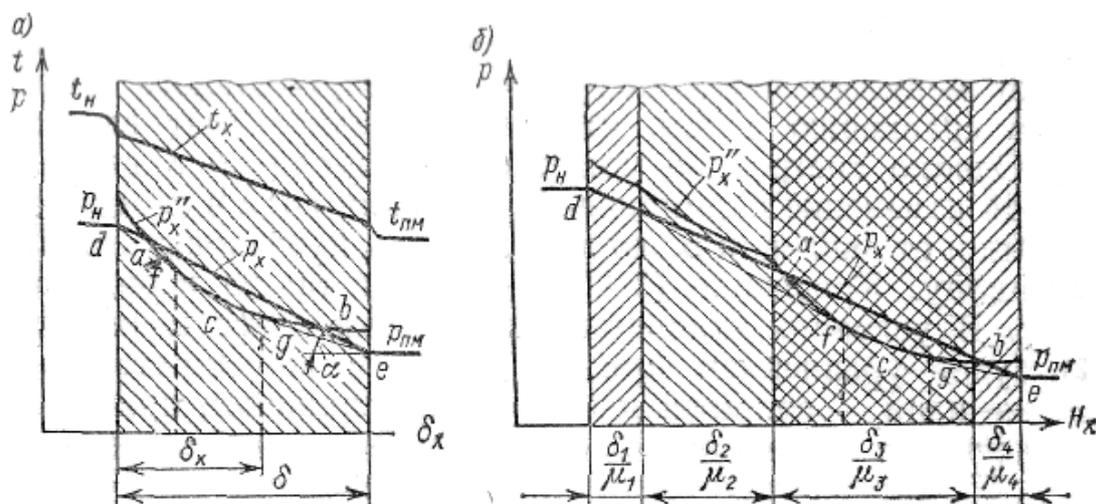


Рис. 3.5. Определение зоны конденсации

и нагляден, но может быть недостаточно точным. Более точно зону конденсации можно установить аналитическим методом. Так, для определения координат точки  $g$  — правой границы зоны конденсации — необходимо решить уравнение  $(p_g - p_{ПМ})/(\delta - \delta_x) = \text{tg } \alpha$  или  $(p_g - p_{ПМ})/(\delta - \delta_x) = dp''_x/d\delta_x$  при  $\delta_x = \delta_g$ . Для его решения надо найти  $p''_x = f(\delta_x)$ , используя аналитические зависимости  $p''_x = f_1(t_x)$  и  $t_x = f_2(\delta_x)$ . В качестве первой из них целесообразно привлечь довольно точную зависимость давления водяного пара над льдом (мбар), данную Ф. Леви в виде  $\lg p''_x = 11,35 \lg(t_r + 140) - 23,9591$  и справедливую в интервале от  $0^\circ$  до  $-40^\circ$  С. Так как для однородной стенки  $t_x = t'_H - (\delta_x/\lambda) q$ , то искомая функция  $\lg p''_x = 11,35 \lg(t'_H + 140 - (\delta_x/\lambda) q) - 23,9591$ . (3.12)

Решение уравнения (3.12) выполняется с помощью ЭВМ. Левая граница зоны конденсации - точка  $f$  — находится аналогично.

Можно определить, какое количество влаги остается (конденсируется) в ограждении. Рисунок показывает, что наличие зоны конденсации изменило характер линии  $p_x = f(\delta_x)$ . На участке касательной до зоны конденсации наклон ее больше наклона касательной после зоны конденсации. Из выражения (3.11а) следует, что в однородном ограждении разница в наклонах

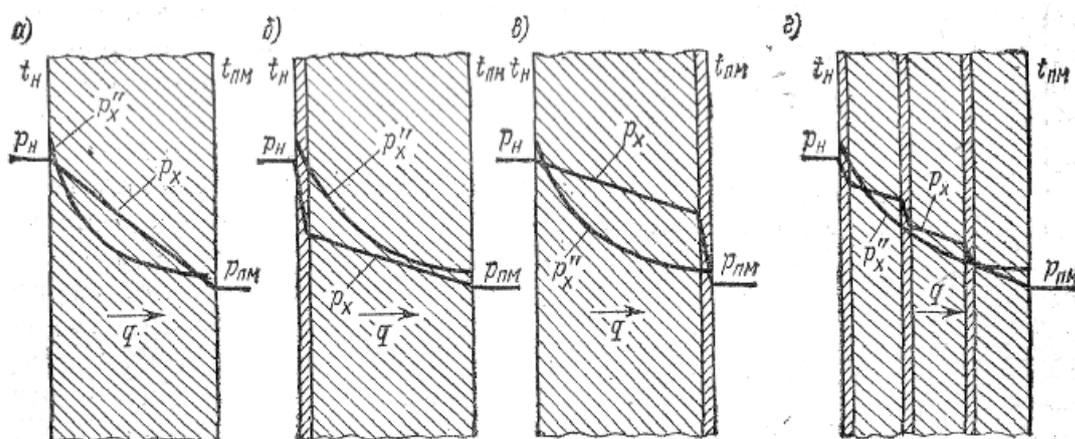
линии  $p_x = f(\delta_x)$  означает уменьшение потока влаги после зоны конденсации. Разница между потоками влаги до зоны конденсации и после нее определяет количество влаги (кг/с), которое конденсируется на  $1 \text{ м}^2$  поверхности ограждения. Можно обозначить это количество через  $\Delta w = w_1 - w_2$ , Тогда

$$\Delta w = \frac{(p_n - p_f)}{H_{df}} - \frac{(p_g - p_{пм})}{H_{ge}}. \quad (3.13)$$

В многослойном (неоднородном) ограждении определение действительной зоны конденсации таким же путем не может быть осуществлено в координатах  $p - \delta$ , так как в этой диаграмме линия  $p_x = f(\delta_x)$  ломаная и, кроме того, при наличии зоны конденсации меняется численное значение парциального давления пара по сравнению с тем, что первоначально дает выражение (3.11). Однако построение может быть выполнено в диаграмме, в которой изменение парциального давления пара в неоднородном ограждении от давления  $p_n$  до давления  $p_{пм}$  происходит по линейному закону. Уравнение (3.11) указывает такую координатную систему. В условиях стационарного потока влаги  $w$  выражение (3.11) будет уравнением прямой линии в координатах  $p - H$  (давление пара — сопротивление паропропусканию), причем величина плотности потока  $w$  окажется угловым коэффициентом этой прямой. Построение такого графика показано на рис. 3.5, б.

Образовавшаяся зона конденсации оказывается очагом дальнейшего увлажнения материала ограждения. Появившаяся капельная влага начинает распространяться по капиллярам и порам материала ограждения, охватывая все более широкие слои ограждения. Хотя суточное количество поступающей влаги невелико, этот процесс может происходить почти непрерывно в течение многих лет эксплуатации холодильного сооружения. При выпадении достаточного количества влаги она переходит в гравитационную и под действием собственной силы тяжести начинает перемещаться в нижерасположенные слои ограждения.

Совершенно естественно, что борьба с образованием зоны конденсации должна вестись путем уменьшения потока влаги через ограждение, что достигается увеличением сопротивления ограждения паропропусканию. Для этого в ограждении предусматривают пароизоляционный слой, представляющий значительное сопротивление паропропусканию. Однако далеко небезразлично, где ставить этот парозащитный слой: до зоны конденсации или после нее, хотя в обоих случаях произойдет одинаковое уменьшение потока влаги. На рис. 3.6, а изображено ограждение, в котором имеется зона конденсации. Для ее устранения поставлен пароизоляционный слой с наружной стороны ограждения (рис: 3.6, б) или, как говорят, с его теплой стороны (со стороны более высокой температуры). В этом случае резкое падение парциального давления пара происходит до основного материала ограждения, благодаря чему линия  $p_x = f(\delta_x)$  в нем идет отлого и ниже линии  $p''_x = f(\delta_x)$ . Зона конденсации здесь не образуется. На рис. 3.6, в показано, что произойдет, если пароизоляция будет поставлена после ограждения — с холодной стороны. Тот же самый перепад  $\Delta p = p_n - p_{пм}$  одинаково распределится по тем же слоям ограждения, но изменение последовательности слоев привело к противоположному результату. Теперь малый наклон линии  $p_x = f(\delta_x)$  в материале ограждения сыграл отрицательную роль, вследствие чего зона конденсации не уменьшилась, а увеличилась. Слой материала с малым паропропусканием создал как бы подпор для потока влаги, вследствие чего возникли условия для еще большего увлажнения материала ограждения.



**Рис. 3.6. Образование зоны конденсации при различном расположении пароизоляционного слоя**

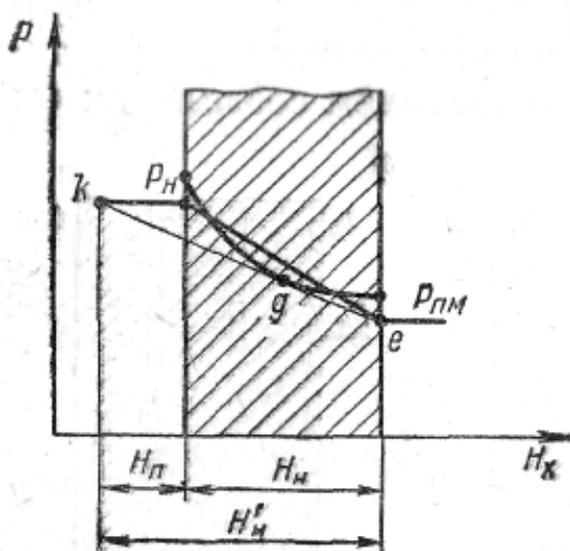
Таким образом, можно утверждать, что пароизоляционный слой только тогда может привести к уменьшению или устранению зоны конденсации, когда он расположен перед слоем возможного образования зоны конденсации или с теплой стороны этого слоя.

При выполнении изоляционных конструкций из нескольких слоев однородного материала между слоями материала иногда создают паропрозрачные слои из битума, применяемого для приклеивания плит теплоизоляционного материала к ограждению и друг к другу. Такого рода промежуточные пароизоляционные слои только ухудшают положение, если в материале образуется зона конденсации (рис. 3.6, з). Здесь то же сопротивление паропрооницанию, что и в двух предыдущих случаях, разделено на три одинаковых, слоя, но увлажнение изоляции при этом не устраняется. Это указывает на то, что пароизоляционный слой должен не раздробляться, а весь сосредоточиваться с теплой стороны ограждения. Указанное обстоятельство заставляет также избегать подклеивания теплоизоляционных материалов сплошным слоем битума или битумной мастики, а осуществлять подклеивание отдельными точками или полосами (например, шириной 5 см через 15 см).

Из рис. 3,6 видно, что в многослойных ограждениях совершенно не безразличен порядок расположения слоев из разных материалов. Очевидно, что материалы в ограждении должны располагаться по ходу потока влаги и в порядке возрастания коэффициента паропрооницаемости. При обратной последовательности каждый последующий слой может оказаться пароизоляционным слоем с холодной стороны для предыдущего слоя. Если при расчете изолированного ограждения выявлена зона конденсации, то необходимо определить сопротивление и толщину пароизоляционного слоя, необходимые для предупреждения конденсации водяного пара в ограждении. По рис. 3.5 можно установить, что зоны конденсации не будет, если плотность потока влаги через все ограждение будет уменьшена до величины  $w_a$  — плотности потока, проходящего после зоны конденсации на участке  $ge$ . Так как из выражения (3.13)  $w_2 = (p_g - p_{пм})/H_{ge}$  и этот поток должен проходить через все ограждение, то  $w_2 = (p_n - p_{пм})/H'_n$ , где  $H'_n$  - сопротивление ограждения паропрооницанию, при котором зоны конденсации не будет. Тогда

$$H'_n = (p_n - p_{пм})/w_2 = ((p_n - p_{пм})/(p_g - p_{пм}))/H_{ge} \quad (3.14)$$

Если сопротивление паропрооницанию ограждения, в котором выявлена зона конденсации, имеет величину  $H_n$ , то необходимое сопротивление пароизоляционного слоя  $H_{п}$  будет  $H_{п} = H'_n - H_n$



**Рис. 3.7. Определение необходимого сопротивления пароизоляционного слоя**

Толщина пароизоляционного слоя при коэффициенте паропроницаемости выбранного материала  $\mu_n$  окажется равной  $\delta_n = \mu_n N_n$ . Величину  $N_n$  можно определить и графическим построением на диаграмме  $p - H$  (рис. 3.7). Для этого касательная  $ge$  должна быть продолжена влево до пересечения с линией постоянного давления  $p_n$  в точке  $k$ .

Иногда для полного устранения зоны конденсации требуется пароизоляционный слой довольно значительной толщины. Поэтому при определении необходимой толщины пароизоляционного слоя можно допускать некоторое накопление влаги в материале, которое за установленный срок эксплуатации изоляции (например, за 20 - 25 лет, после которых изоляцию надо заменить) вызовет определенное ухудшение характеристик теплоизоляционного материала. Исходя из того, что за этот срок может быть увеличен коэффициент теплопроводности материала в два раза, И. Ф. Душин (ВНИХИ) предложил определять необходимое сопротивление паропроницанию пароизоляционного слоя ( $m^2 \cdot ч \cdot мм. рт. ст./г$ ) по формуле  $N_n = 1,6 (p_n - p_{пм})$ . Учитывая кратковременность внешних условий, по которым ведется расчет, строительные нормы ФРГ допускают расчетное выпадение влаги в ограждении, определяемое по выражению (3.13), до  $0,15 \times 10^{-7} \text{ кг}/(m^2 \cdot c)$  и на основании этого рекомендуют определять толщину пароизоляционного слоя.

В действительных условиях работы холодильных сооружений рассмотренный вопрос существенно усложняется изменением температуры наружного воздуха от самых высоких для данной местности летних температур до самых низких зимних. В зимнее время возможны случаи (при температурах наружного воздуха ниже температуры в охлаждаемом помещении), когда поток влаги будет иметь обратное направление, т. е. из помещения наружу. Однако такое изменение направления потока влаги может иметь значение только для помещений с относительно высокими температурами (выше  $+5^\circ \text{ C}$ ) и в местностях с относительно низкими среднемесячными температурами наружного воздуха зимой. Для таких помещений, у которых обратный поток влаги в зимнее время достаточно заметен, необходимо, ставить пароизоляцию с обеих сторон теплоизоляции, т. е. с теплой и с холодной сторон, принимая все меры для того, чтобы теплоизоляционный материал укладывался в ограждение в сухом состоянии.

Хотя диффузионный поток водяного пара и является обычно главной причиной увлажнения, надо иметь в виду, что он не единственный возможный источник увлажнения. Теплоизоляционные материалы приходится охранять от непосредственного соприкосновения с проводниками капиллярной влаги: влажным грунтом, влажным земляным покровом на плоской крыше, увлажняемыми атмосферными осадками наружными стенами. Иногда увлажнение изоляционных материалов происходит от различного рода дефектов строительных конструкций, от протечек в кровлях, от неисправных водосточных желобов, от трещин в стенах и т. п. Все это вынуждает делать пароизоляцию с теплой стороны даже тогда, когда расчетом доказывается невозможность появления зоны конденсации. В таком случае предусматривается минимальный возможный слой паро- и гидрозащиты. Кроме случая, рассмотренного выше, пароизоляционный слой с холодной стороны следует предусматривать и в помещениях с большими влаговыделениями, приводящими к осаждению или попаданию капельной влаги на ограждения.

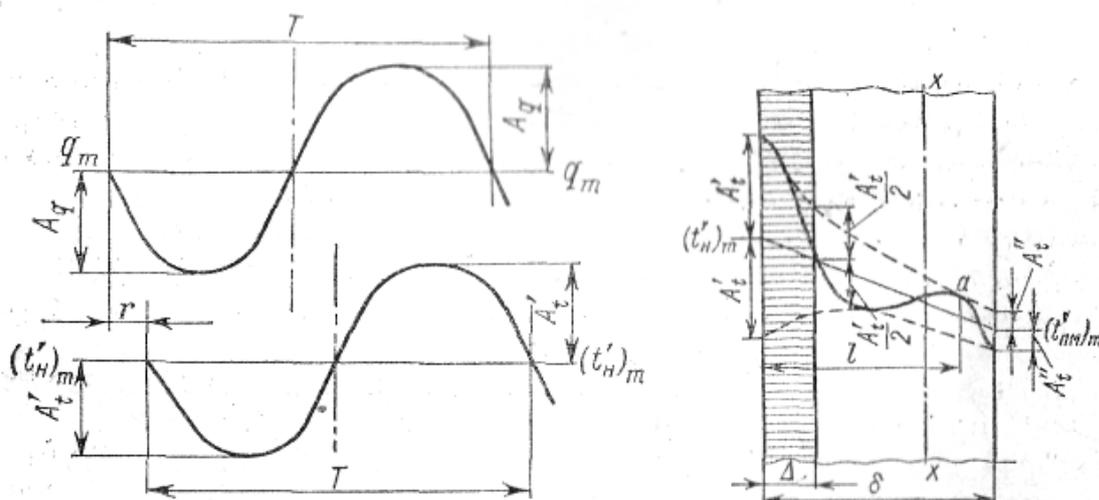
Испытания изоляционных конструкций ограждений на действующих холодильниках, проведенные ВНИХИ и ЛТИХП, показали в ряде случаев значительное увлажнение теплоизоляционных материалов в ограждениях. Установлено, что пароизоляция, выполненная путем нанесения тонкого слоя битума, является недостаточной и часто паропроницаемой из-за плохого качества работ и наличия трещин.

### § 3. 5.

#### ПОНЯТИЕ О ТЕПЛОУСТОЙЧИВОСТИ ОГРАЖДЕНИЙ

Для упрощения расчетов предполагались постоянство теплового потока через ограждение и стационарность в нем температурного поля. В действительности, передача теплоты через ограждения охлаждаемых объектов осуществляется в нестационарных условиях, что прежде всего обусловлено периодическими изменениями температуры наружного воздуха и периодическим воздействием солнечной радиации им наружную поверхность ограждения. Так, в южных районах страны амплитуда суточных колебаний температуры наружного воздуха достигает 13 - 15 К, что вызывает соответственные изменения температуры наружной поверхности ограждения; амплитуда

колебаний этой температуры может значительно возрасти из-за действия солнечного излучения на наружную поверхность ограждения.



**Рис. 3.8. Гармонические колебания теплового потока, проходящего через ограждение, и температуры наружной поверхности ограждения**

В таких условиях ограждения охлаждаемых объектов должны обладать теплоустойчивостью. *Теплоустойчивость* есть свойство ограждения сохранять относительное постоянство температуры на внутренней поверхности при колебаниях плотности теплового потока. В холодильных сооружениях допустимые колебания температуры на внутренней поверхности пока не нормируются, но надо полагать, что они не должны быть больше допускаемых колебаний температуры внутри охлаждаемых помещений, т. е.  $\pm 0,5$  К. Следовательно, объективно возникающие колебания температуры наружной поверхности ограждения должны существенно затухать в ограждении, имеющем достаточную теплоустойчивость, чтобы не оказывать большого влияния на температуру, поддерживаемую внутри охлаждаемого объекта, и на состояние хранящихся или обрабатываемых продуктов.

Обычно рассмотрение свойства теплоустойчивости ограждений ведут, предполагая, что колебания температуры наружного воздуха являются простыми гармоническими колебаниями. Если происходит синусоидальное изменение наружной температуры  $t_n$  то плотность теплового потока  $q$  через ограждение будет изменяться также по синусоиде и с тем же периодом  $T$  часов (рис. 3.8). Средняя плотность теплового потока  $q_m = ((t_n)_m - t_{пм})$  где  $(t_n)_m$  — среднее значение наружной температуры за период времени  $T$ .

Поскольку амплитуда колебаний плотности теплового потока  $A_q$ , то изменение плотности теплового потока происходит от  $q_m - A_q$  до  $q_m + A_q$ . Изменение температуры наружной поверхности ограждения от среднего значения  $(t'_n)_m$  при амплитуде  $A'_t$  будет осуществляться с тем же периодом  $T$ , но запаздывать по времени на  $r$  часов.

Для однородной стенки (рис. 3.9) величина отклонения температуры  $t$  в любом сечении  $x$  ограждения от средней температуры  $t_{mx}$  в этом же сечении в момент времени  $\tau$  составляет для затухающих гармонических колебаний

$$\Theta_x = t_x - t_{mx} = A'_t \exp \left\{ -x [w/(2a)]^{0,5} \right\} \cos \left\{ w\tau - x [w/(2a)]^{0,5} \right\} \quad (3.15)$$

где  $w = 2\pi/T$  — частота колебаний;  $a$  — коэффициент температуропроводности материала ограждения.

Именно экспоненциальная функция в выражении (3.15) определяет величину амплитуды колебаний в любом сечении  $x$ . С увеличением  $x$  амплитуда колебаний быстро уменьшается; она меньше, если колебания осуществляются с большей частотой и если распространяются в материале с малой температуропроводностью.

Для наружной поверхности ограждения ( $x = 0$ ) уравнение (3.15) примет вид  $\Theta_{x=0} = t_n - ((t_n)_m = A' t \cos \omega t$ .

Плотность теплового потока, поступающего от поверхности ограждения внутрь ограждения в данный момент времени  $\tau$ ,

$$q_{x=0} = -\lambda (d\Theta/dx)_{x=0} = \lambda A' t [w/(2a)]^{0,5} (\cos \omega \tau - \sin \omega \tau).$$

Так как по формуле косинуса суммы углов  $\cos [\omega \tau + (\pi/4)] = (\cos \omega \tau - \sin \omega \tau)/2^{0,5}$ , то

$$q_{x=0} = \lambda A' t (w/a)^{0,5} \cos (\omega \tau + \pi/4) \text{ или}$$

$$q_{x=0} = A' t (2\pi\lambda c\rho_{об}/T)^{0,5} \cos (\omega \tau + \pi/4). \quad (3.16)$$

Выражение (3.16) подтверждает, что колебания плотности теплового потока происходят с тем же периодом  $T$ , но опережают по фазе колебания температуры поверхности ограждения на  $\pi/4$ . В этой формуле произведение  $A' t (2\pi\lambda c\rho_{об}/T)^{0,5}$  является амплитудой плотности теплового потока  $A_q$ . Ее отношение к амплитуде колебаний  $A' t$  температуры поверхности, периодически воспринимающей этот тепловой поток, равное  $A_q/A' t$ , называется *коэффициентом теплоусвоения поверхности ограждения* [Вт/(м<sup>2</sup>-К)], т. е.  $s = A_q/A' t$  или  $s = (2\pi\lambda c\rho_{об}/T)^{0,5}$ .

Коэффициент теплоусвоения представляет собой максимальное изменение плотности теплового потока, вызывающее колебания температуры на поверхности в 1 К. Для ограждения из однородного материала, при достаточной толщине стенки, теплоусвоение оказывается физической характеристикой стенки и оценивается *коэффициентом теплоусвоения материала*. Он также характеризует способность материала более или менее воспринимать теплоту при колебаниях температуры на его поверхности.

Если период колебаний  $T = 24$  ч, то коэффициент теплоусвоения обозначается  $s_{24}$  и равен  $s_{24} = 0,27 (\lambda c\rho_{об})^{0,5}$ , если теплоемкость подставляется в кДж/(кг-К). Теплоизоляционные материалы, обладающие малыми  $\lambda$  и  $\rho_{об}$ , имеют и относительно малый коэффициент теплоусвоения (табл.3.5).

**Таблица 3.5 Коэффициенты теплоусвоения некоторых материалов**

Материал	$\lambda$ , Вт/(м*К)	$\rho_{об}$ , кг/м <sup>3</sup>	$s_{24}$ , Вт/(м <sup>2</sup> К)
Сталь	45,400	7850	109,30
Мрамор	2,900	2800	26,40
Бетон	1,190	2400	15,35
Дерево	0,107	450	3,02
Минеральноватные плиты	0,093	400	1,43
Пенополистирол	0,047	30	0,34
Пенополиуретан	0,019	15	0,22

Различной величиной коэффициента теплоусвоения объясняется, например, тот факт, что предметы из разных материалов с резко отличным теплоусвоением, находящиеся в одном помещении, т. е. имеющие одинаковую температуру, при прикосновении к ним кажутся — одни теплыми, а другие — холодными. Теплоизоляционные материалы высокой эффективности обладают весьма низкими коэффициентами теплоусвоения, т. е. при изменении температуры поверхности отдают меньшее количество теплоты и поэтому должны применяться для изоляции сооружений с резко переменным режимом работы (испытательные камеры, регенераторы и т. п.).

В результате затухания колебаний температуры в толще ограждения (рис. 3.9) на внутренней поверхности при средней температуре поверхности  $t'_{нм}$  колебания имеют значительно меньшую амплитуду  $A' t$ . Штриховые линии по обеим сторонам прямой линии падения температуры при стационарном режиме представляют собой геометрические места точек, характеризующих максимальные и минимальные значения температур в соответствующих плоскостях ограждения, изменяющиеся в интервале  $t_x \pm (A_t)_x$ .

Отношение амплитуды  $A' t$  на поверхности ограждения, воспринимающей колебания температуры внешней среды, к амплитуде  $A'' t$  на внутренней поверхности называется *затуханием амплитуд*  $v$  внутри ограждения толщиной  $\delta$ , т. е.  $v = A' t/A'' t$ . Из зависимости (3.15) амплитуда колебаний температуры внутренней поверхности  $A'' t = A' t (\exp [-\delta(w/2a)^{0,5}])$ . Тогда  $v = \exp [\delta (w/2a)^{0,5}]$ . Если показатель степени в последнем выражении умножить и разделить на  $K$ , то можно получить

$$v = \exp((\delta/\lambda)(2\pi\lambda c\rho_06/T)^{0,5}/2^{0,5}), \text{ или } v = \exp(Rs/2^{0,5}). \quad (3.17)$$

Теперь в показатель степени входит произведение термического сопротивления слоя материала на коэффициент теплоусвоения этого материала. Эту безразмерную величину  $D = Rs$  называют *характеристикой тепловой инерции* (массивности) *ограждения*, выполненного из данного материала. Как видно из выражения (3.17), она является мерой интенсивности затухания колебаний температуры внутри однородного ограждения.

Поскольку  $\exp(1/2)^{0,5} = 2$ , то выражение (3.17) примет вид  $v = 2^{Rs} = 2^D$ . Из него следует, что при  $D = 1$  затухание колебаний  $v = 2$ . Массивностью  $D = 1$  характеризуется так называемый слой резких колебаний температуры — слой, непосредственно прилегающий к поверхности, воспринимающей периодически поступающую теплоту. При прохождении через него тепловой волны амплитуда колебаний температуры уменьшается в два раза. Действительная толщина  $\Delta$  слоя резких колебаний может быть найдена по соотношению  $(\Delta/\lambda)s = 1$ , из которого  $\Delta = \lambda/s$ . Например, для стали  $\Delta = 45,4/109,3 = 0,415$  м, а для пенополиуретана  $\Delta = 0,019/0,22 = 0,086$  м.

Помимо того, что колебания температуры в ограждении затухают по мере удаления от наружной поверхности, они еще и запаздывают по времени. Это показано на рисунке толстой волнообразной линией, характеризующей температуру в любой плоскости ограждения в момент времени, соответствующий максимальной температуре на наружной поверхности  $(t'_n)_m + A't$ . В точке  $a$  колебания температуры отстают от колебаний температуры на наружной поверхности на время, равное периоду колебаний, т. е. на  $T$  часов. Расстояние  $l$  представляет собой длину волны. Число волн, располагающихся в толще ограждения, зависит от показателя  $D$  тепловой инерционности ограждения. В ограждении, имеющем  $D = 8,5$ , располагается одна температурная волна, т. е. колебания температуры наружной поверхности, произошедшие сегодня, при  $T = 24$  ч придут на внутреннюю поверхность завтра в то же время;  $D < 8,5$  соответствует неполная температурная волна в ограждении, а  $D > 8,5$  — более одной температурной волны. Для многослойного ограждения его массивность определяется как сумма массивностей отдельных слоев, т. е.

$$D = R_1s_1 + R_2s_2 + R_3s_3 + \dots, \quad (3.18)$$

хотя это и неточно, поскольку выражение (3.18) не учитывает затухания тепловой волны при переходе из одного материала в другой. Ограждение считается легким, если  $D < 4$ , средним — при  $D = 4-7$  и массивным — при  $D > 7$ .

### § 3.6.

#### ИЗОЛЯЦИОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ ОГРАЖДЕНИЙ

Об изоляции холодильных сооружений иногда говорят, что нет плохих изоляционных материалов, а есть плохие изоляционные конструкции. В определенной степени это справедливо. На самом деле, имеются примеры плохого состояния изоляции, выполненной из хороших материалов, и в то же время известны случаи многолетней эксплуатации без нарушения качества далеко небезупречных изоляционных материалов. В связи с этим весьма важно установить, каким требованиям должна удовлетворять хорошая изоляционная конструкция.

1. Изоляционная конструкция должна быть экономичной. Это не значит быть просто дешевой, хотя последнее и имеет большое значение из-за высокой доли стоимости изоляции в сумме общих затрат на холодильное сооружение. Через наружные ограждения в охлаждаемые помещения во многих случаях поступает не менее половины всех теплопритоков. Уменьшить проникновение теплоты через ограждение можно, как известно, увеличением толщины слоя теплоизоляционного материала. Однако неразумно увеличивать ее беспредельно. При некоторой толщине ограждения или, что то же, при некотором коэффициенте теплопередачи приведенные затраты на ограждение окажутся минимальными, что позволяет найти значение оптимального коэффициента теплопередачи, соответствующего этому минимуму.

Если обозначить через  $Z_{пр}$  сумму приведенных годовых затрат в руб., отнесенных к  $1 \text{ м}^3$  изолированного ограждения, то она будет равна

$$Z_{пр} = S + E_n K, \quad (3.19)$$

где  $S$  - годовые эксплуатационные затраты;  $K$  — капитальные затраты на изоляционную конструкцию;  $E_n$  — нормативный коэффициент эффективности капитальных затрат.

Эксплуатационные затраты, связанные с теплоизоляционными конструкциями,  $S = A + E + U$ , где  $A$  - амортизационные отчисления от стоимости изоляции;  $E$  - энергетические затраты на покрытие теплопритоков через изоляцию;  $U$  — стоимость продуктов, потерянных из-за усушки, вызванной проникновением теплоты через изолированное ограждение. Все члены зависимости (3.19) являются функцией от толщины теплоизоляционного слоя  $\delta_{из}$  или от коэффициента теплопередачи ограждения  $k_n$ . Причем члены, связанные с капитальными затратами ( $A + E_n K$ ), возрастают с увеличением  $\delta_{из}$  (или с уменьшением  $k_n$ ), а затраты энергии и потери от усушки имеют противоположную тенденцию.

.Оптимальная толщина изоляции, соответствующая минимальным приведенным затратам, может быть найдена, если приравнять нулю производную  $Z_{пр}$  по  $\delta_{из}$ , т. е.  $dZ_{пр}/d\delta_{из} = 0$ , что дает возможность найти  $(\delta_{из})_{опт}$  или  $k_{n, опт}$ . Определение  $k_{n, опт}$  может быть проведено и графически, как это показано на рис. 3.10. Нужно сказать, что кривая  $Z_{пр} = f(k_n)$  имеет довольно пологий (расплывчатый) минимум, вследствие чего существенные отклонения от  $k_{n, опт}$  (на 20—30%) приводят к отклонению от  $Z_{пр, мин}$  не более чем на 5—10%. СНиП 105—74 установлены нормативные значения  $k_n$  для наружных стен охлаждаемых помещений (табл. 3.6), несколько большие, чем оптимальные.

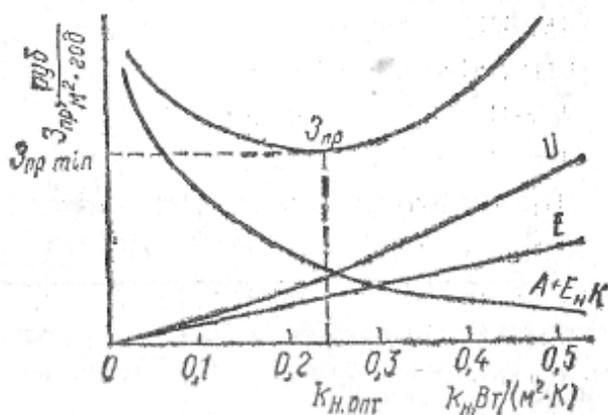


Рис. 3.10. Графическое определение оптимального коэффициента теплопередачи изолированного ограждения

Таблица 3.6 Коэффициенты теплопередачи наружных ограждений

Средняя годовая температура в районе строительства, °С	Коэффициент теплопередачи $k_n$ [Вт/м²К] при температуре в охлаждаемом помещении, °С					
	—30	—20	-10	-4	4	12
0 и ниже	0,210	0,255	0,325	0,465	0,580	0,700
Выше 0, ниже 9	0,200	0,235	0,280	0,350	0,510	0,640
9 и выше	0,185	0,210	0,235	0,280	0,350	0,525

Для помещений с различной температурой надо

создавать ограждения с одинаково экономичной изоляцией. Это может быть обеспечено тогда, когда через каждое наружное ограждение независимо от температуры внутри помещения будет проходить тепловой поток с одинаковой плотностью. Для камер холодильников данным, приведенным в табл. 3.6, соответствует оптимальная плотность теплового потока 10—12 Вт/м². Для транспортных и мелких установок это значение может быть повышено до 16—18 Вт/м². При низких температурах (до —100° С) численное значение оптимального теплового потока повышается, достигая для небольших установок 20 Вт/м².

Коэффициенты теплопередачи покрытий охлаждаемых помещений с отрицательными температурами принимаются меньше, чем наружных стен, на 7—10%, а для помещений с положительными температурами - на 15 - 25%, учитывая заметное увеличение теплового потока от действия солнечной радиации.

Значения коэффициентов теплопередачи обогреваемых полов, лежащих на грунте, принимаются по табл. 3.7.

2. Изоляционная конструкция ограждения должна обеспечить необходимый перепад между температурой поверхности и температурой окружающего воздуха. Этот температурный перепад определяется или технологическими требованиями, или необходимостью воспрепятствовать конденсации влаги на поверхности ограждения.

Для стационарного теплового потока, если задана разность температур в охлаждаемом помещении  $t'_{\text{пм}} - t_{\text{пм}}$  (рис. 3.2), коэффициент теплопередачи ограждения из зависимостей (3.1) и (3.3) равен  $k = \alpha_{\text{пм}}(t'_{\text{пм}} - t_{\text{пм}})/(t_{\text{н}} - t_{\text{пм}})$  (3.20)

**Таблица 3.7 Коэффициент теплопередачи обогреваемых полов**

Температура воздуха в помещении, °С	Коэффициент теплопередачи $k_{\text{п}}$ , Вт/(м <sup>2</sup> К)
От 4 до — 4	0,405
—10	0,290
От —20 до —30	0,210

В действительности, тепловой поток нестационарен из-за колебаний температуры  $t_{\text{н}}$ , что будет вызывать, в свою очередь, колебания температуры поверхностей  $t'_{\text{н}}$  и  $t'_{\text{пм}}$  - Амплитуда колебаний этих температур зависит от массивности ограждений. Для учета нестационарности режима в уравнение (3.20) вводится множитель  $1/m$ , характеризующий массивность ограждений. Тогда уравнение для коэффициента теплопередачи примет окончательный вид

$$k = \alpha_{\text{пм}} (t'_{\text{пм}} - t_{\text{пм}})/(t_{\text{н}} - t_{\text{пм}}) m] \quad (3.20a)$$

Для массивных ограждений  $m = 1,00$ ; для ограждений средней массивности  $m = 1,10$ ; для легких ограждений  $m = 1,15$ .

Чтобы не допустить конденсацию пара из воздуха на поверхности ограждения, разделяющего два помещения с температурами  $t_1$  и  $t_2$  (пусть  $t_1 > t_2$ ), нужно, чтобы температура поверхности  $t'_1$  была выше температуры точки росы  $t_{\text{р1}}$  воздуха в помещении 1 при его влажности  $\phi_1$  т. е.

$$t'_1 > t_{\text{р1}} \quad (3.21)$$

Тогда  $k = \alpha_1 (t_1 - t'_1)/(t_1 - t_2) m$  или  $k < \alpha_1 (t_1 - t_{\text{р1}})/(t_1 - t_2)m$ . С учетом коэффициента запаса, обеспечивающего выполнение неравенства (3.21), коэффициент теплопередачи ограждения

$$k = 0,95 \alpha_1 (t_1 - t_{\text{р1}})/(t_1 - t_2)m \quad (3.22)$$

По условию недопущения конденсации пара на поверхности, обращенной в теплое помещение, должен определяться коэффициент теплопередачи внутренних помещений (перегородок, междуэтажных перекрытий). Нормативные значения коэффициентов теплопередачи внутренних ограждений приведены в табл. 3.8.

На недопущение конденсации влаги па поверхности стены со стороны камеры приходится проверять в некоторых случаях и наружные ограждения камер с отрицательными температурами при летних расчетных условиях и камер с положительными температурами при зимних расчетных условиях. При расчете коэффициента теплопередачи принимаются значения коэффициентов теплоотдачи  $\alpha_{\text{пм}}$ , равные 6—7 Вт/(м<sup>2</sup>-К).

**Таблица 3.8 Коэффициент теплопередачи внутренних ограждений**

Температура воздуха в более теплом помещении, °С	Коэффициент теплопередачи Вт/(м <sup>2</sup> К) при температуре воздуха в более холодном помещении, °С					
	-30	— 20	-10	-4	4	12
-30	0,580	-	-	-	-	-
-20	0,500	0,580	-	-	-	-
-10	0,370	0,405	0,580	-	-	-

-4	0,280	0,325	0,405	0,580	-	-
4	0,245	0,255	0,300	0,465	0,580	-
12	0,210	0,220	0,255	0,405	0,525	0,755
18	0,200	0,210	0,230	0,350	0,465	0,700

По вычисленному или принятому коэффициенту теплопередачи может быть определена толщина слоя теплоизоляционного материала. Если ограждение представляет собой многослойную стену, то

$$k = 1/(1/\alpha_n + \Sigma(\delta_i/\lambda_i) + (\delta_{из}/\lambda_{из}) + 1/\alpha_{пм}). \quad (3.23)$$

где,  $\Sigma(\delta_i/\lambda_i)$  — сумма термических сопротивлений всех слоев ограждения, кроме слоя теплоизоляционного материала;  $\delta_{из}$  и  $\lambda_{из}$  — толщина слоя и коэффициент теплопроводности теплоизоляционного материала в конструкции ограждения.

Из формулы (3.23) находится выражение для определения толщины слоя  $\delta_{из}$  (м) теплоизоляционного материала

$$\delta_{из} = \lambda_{из} (1/k - (1/\alpha_n + \Sigma(\delta_i/\lambda_i) + 1/\alpha_{пм})) \quad (3.24)$$

Действительная толщина теплоизоляционного слоя при применении штучных материалов получается округлением найденного размера до величины, кратной стандартной толщине выпускаемых изделий. Теплоизоляцию следует выполнять по меньшей мере из двух слоев плит или блоков для того, чтобы при производстве теплоизоляционных работ можно было перекрывать швы (стыки) первого слоя материала плитами или блоками второго слоя.

Условием недопущения конденсации пара из воздуха на наружной поверхности должна отвечать также изоляция аппаратов и холодных трубопроводов. Во избежание образования влаги на поверхности трубопроводов (рис. 3.11) должно осуществляться неравенство (3.21).

Если пренебречь термическим сопротивлением теплоотдачи от внутренней поверхности трубы и термическим сопротивлением стенки трубы, то можно написать выражение плотности теплового потока  $q'$  через изолированную трубу (Вт) на 1 м ее длины в случае стационарного режима

$$(3.27) \quad q' = \pi(t_1 - t_a) / \{ 1/(\alpha_1 D_{из}) + [1/(2\lambda_{из})] \ln (D_{из}/d_{из}) \} = \pi(t_1 - t'_1) / [1/(\alpha_1 D_{из})]$$

Равенство (3.25) может быть написано в виде

$$(t_1 - t'_1) / (t_1 - t_a) = 1 / \{ 1 + [\alpha_1 D_{из} / (2\lambda_{из})] \ln (D_{из}/d_{из}) \}$$

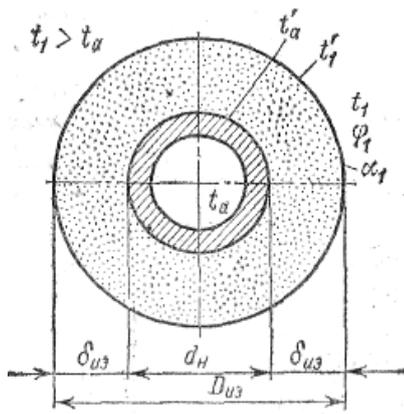
Для выполнения неравенства (3.21) должно быть:

$$(3.28) \quad (t_1 - t_{p1}) / (t_1 - t_a) > 1 / \{ 1 + [\alpha_1 D_{из} / (2\lambda_{из})] \ln (D_{из}/d_{из}) \};$$

$$0,95(t_1 - t_{p1}) / (t_1 - t_a) = 1 / \{ 1 + [\alpha_1 D_{из} / (2\lambda_{из})] \ln (D_{из}/d_{из}) \}$$

Искомая величина  $\delta_{из} = (D_{из} - d_n)/2$  находится из уравнения (3.26), которое проще всего решать методом последовательного приближения, задаваясь значениями  $D_{из}$ , или же вычислением на ЭВМ. Как известно, отношение  $2\lambda_{из} / \alpha_1$  представляет собой критический диаметр изоляции  $D_{кр}$ , при котором тепловой поток через изоляцию трубопровода достигает максимального значения  $q'_{max}$  (рис. 3.12). В связи с этим зависимость (3.26) примет вид

$$(3.26a) \quad 0,95 (t_1 - t_{p1}) / (t_1 - t_a) = 1 / [1 + (D_{из}/D_{кр}) \ln (D_{из}/d_{из})]$$



**Рис. 3.11 Теплоизоляция холодного трубопровода**

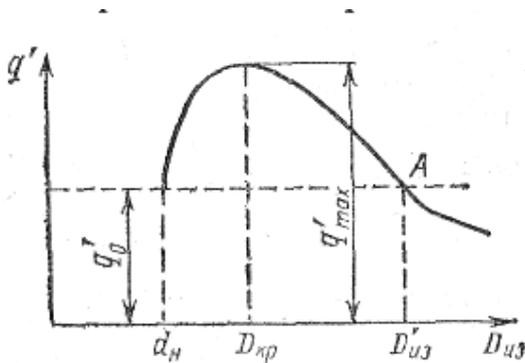
При решении уравнения (3.26) необходимо выбирать  $D_{из} > D_{кр}$ , что заставляет применять для изоляции холодных трубопроводов эффективные и высокоэффективные материалы с малым значением  $\lambda_{из}$ , чтобы уменьшить величину  $D_{кр}$ . Особенно важно уменьшение  $D_{кр}$  для изоляции трубопроводов диаметром менее 50 мм. Требуется также, чтобы тепловая изоляция холодных трубопроводов выполняла и второе свое назначение: уменьшала теплоприток через стенку трубы. Из рис. 3.12 видно, что эта функция выполняется только при  $D_{из} > D'_{из}$ , так как только тогда плотность теплового потока  $q'$  через изоляцию станет меньше плотности теплового потока  $q'_0$  через стенку неизолированной трубы. Точке А соответствует равенство  $q' = q'_0$  или

$$\pi(t_1 - t_a) / \{1/(\alpha_1 D'_{из}) + [1/(2\lambda_{из})] \ln (D'_{из}/d_n)\} = \pi(t_1 - t_a) / [1/(\alpha_1 d_n)],$$

откуда  $1/(\alpha_1 D'_{из}) + [1/(2\lambda_{из})] \ln (D'_{из}/d_n) = 1/(\alpha_1 d_n)$ . Полученное выражение легко приводится к виду

$$(3.27) \quad 1 + (D'_{из}/D_{кр}) \ln (D'_{из}/d_n) = D'_{из}/d_n$$

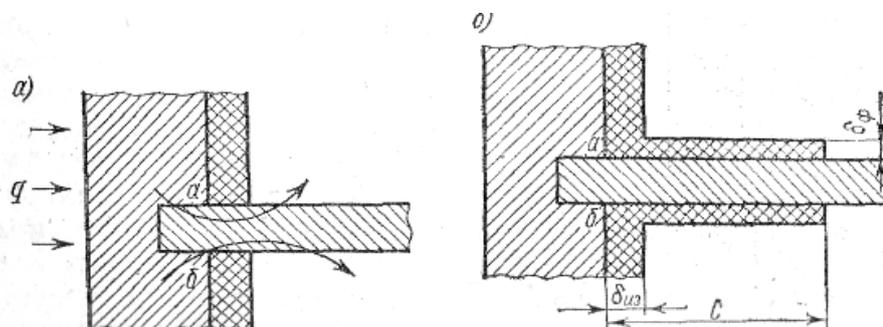
Решение этого уравнения дает возможность найти толщину изоляционного слоя, при которой теплоприток через изоляцию оказывается одинаковым с теплопритоком через неизолированную трубу. Очевидно, что уменьшение теплопритока по сравнению с неизолированной трубой возможно лишь при соблюдении неравенства



$$(3.27a) \quad [1 + (D_{из}/D_{кр}) \ln (D_{из}/d_n)] > D_{из}/d_n$$

**Рис. 3.12 Зависимость плотности теплового потока через изоляцию трубопровода от толщины теплоизоляционного слоя**

3. Изоляционная конструкция должна обеспечить непрерывность как теплоизоляционного, так и пароизоляционного слоев по всей поверхности охлаждаемого сооружения. При наличии одиночного охлаждаемого помещения это условие легко выполняется путем укладки изоляции по внутренней поверхности ограждений. Чтобы обеспечить непрерывность изоляции при большом количестве охлаждаемых помещений и в многоэтажных сооружениях, приходится прибегать к специальным строительным конструкциям.



**Рис. 3.13** Нарушение непрерывности изоляционного слоя в обычных строительных конструкциях многоэтажных зданий

При обычных строительных конструкциях промышленных многоэтажных зданий непрерывность изоляционного слоя будет нарушаться междуэтажными перекрытиями (рис. 3.13, а) и внутренними стенами. В этом случае в изолированном ограждении образуются места с меньшим термическим сопротивлением слоя теплоизоляционного материала. Такие места называются тепловыми мостиками. В тепловых мостиках происходит концентрация плотности потока, вследствие чего в этих местах теплопритоки увеличиваются непропорционально площади мостиков. Но значительно больший вред приносят тепловые мостики тем, что они являются очагами увлажнения изоляционной конструкции. На самом деле, в плоскости *ab* междуэтажного перекрытия температура гораздо ниже, чем на теплой поверхности теплоизоляционного слоя, что может вызвать здесь конденсацию пара и дальнейшее продвижение влаги по материалу под действием капиллярных, а затем и гравитационных сил.

Можно воспрепятствовать вредному влиянию тепловых мостиков путем выполнения возле них изолированных панелей или так называемых фартуков (в судостроении именуемых риббандами), показанных на рис. 3.13, б. Для определения длины фартука *C*, достаточной для устранения вредных последствий от наличия теплового мостика, в первом приближении можно считать, что сопротивление передаче теплоты вдоль мостика, покрытого фартуком, должно равняться термическому сопротивлению основного теплоизоляционного слоя, т. е.  $\delta_{из}/\lambda_{из} = C/\lambda_m$ , откуда

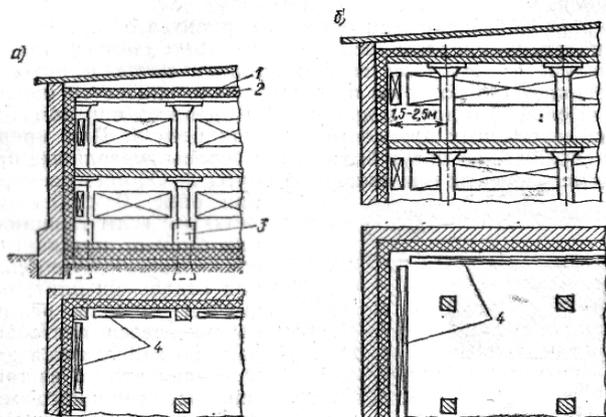
$$(3.28) \quad C = \delta_{из} \lambda_m / \lambda_{из}$$

где  $\lambda_m$  - коэффициент теплопроводности материала теплового мостика.

Так как коэффициент теплопроводности строительных материалов значительно больше коэффициента теплопроводности изоляционных материалов, то длина фартука оказывается равной 1,0-1,5 м. Толщина изоляционного слоя фартука  $\delta_f$  берется обычно  $1/2\delta_{из}$ . Устройство фартука влечет за собой повышенный расход теплоизоляционных материалов, появление уступа на полу помещения и уменьшение полезного объема помещения. По этим причинам оно может выполняться лишь при невозможности осуществления более рациональных конструкций.

При строительстве многоэтажных холодильников для создания непрерывного изоляционного слоя применяются специальные строительные конструкции, называемые этажерочными. Такая конструкция представляет собой монолитную или сборную железобетонную этажерку, у которой колонны выполняют функцию стоек, а междуэтажные перекрытия - полки. Вся нагрузка от

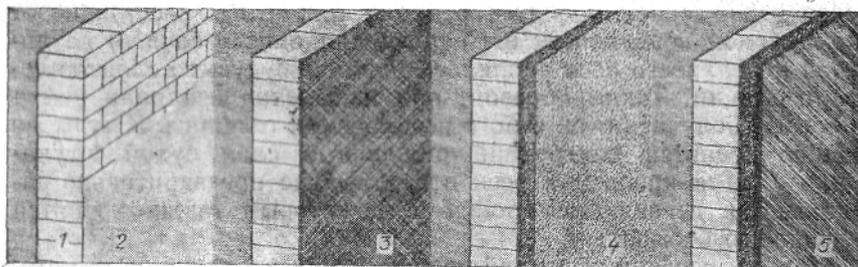
уложенных грузов передается через перекрытия на колонны, В такой конструкции наружные стены испытывают нагрузку только от собственной массы, т. е. являются самонесущими и защищают изоляционный слой от механических повреждений и атмосферных осадков.



**Рис. 3.14 Создание непрерывного изоляционного слоя в этажерочных конструкциях многоэтажных зданий**

Этажерочные конструкции применяются в двух основных вариантах: с пристенными колоннами (рис. 3.14, а) и с консольными перекрытиями (рис. 3.14, б). Обе конструкции позволяют создать непрерывный слой теплоизоляции 2 и пароизоляции 1. Как видно, непрерывность изоляционного слоя в этих случаях нарушается только по колоннам. Поэтому, когда колонны проходят через слой тепловой изоляции, их приходится изолировать (снизу или сверху - в зависимости от того, где проходит теплоизоляционный слой) фартуками 3 (рис. 3.14, а). Не вдаваясь в оценку этих конструкций с точки зрения строительной техники, можно отметить достоинства варианта с консольными перекрытиями, заключающиеся в том, что облегчается выполнение изоляционного слоя (отсутствуют трудности с укладкой изоляции за колоннами), а также наблюдение за состоянием изоляции и ее ремонт; упрощается изготовление и монтаж охлаждающих приборов 4.

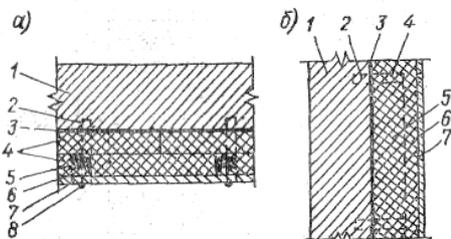
В наиболее распространенных изоляционных конструкциях при применении штучных теплоизоляционных материалов (рис. 3.15) теплоизоляционный слой 4 защищается наружной стеной 1, выполняемой из кирпича (или железобетона, бетонных камней, природных камней и т. п.). Выравнивающий слой штукатурки 2 накладывается на стену для сглаживания неровностей внутренней поверхности кладки, так как наносить битумный слой и наклеивать пароизоляционные материалы (слой 3) следует только на ровную поверхность. Со стороны охлаждаемого: помещения слой тепловой изоляции покрывается штукатуркой 5. Изоляционная конструкция должна быть достаточно надежной и прочной.



**Рис. 3.15 Стена, изолированная штучными теплоизоляционными материалами**

На рис. 3.16, а показан один из вариантов обеспечения, прочности конструкции, выполненной из плитных теплоизоляционных материалов. Плиты 4 не только приклеиваются к поверхности

ограждения / (на которую предварительно наносится пароизоляционный слой 3) и друг к другу, но и крепятся при помощи каркаса из деревянных антисептированных реек 5. Для крепления реек к ограждению могут быть использованы деревянные пробки, закладные элементы или анкерные болты 2. Обычно размер сечения реек 50 X 50 или 50 X 60 мм; если толщина плит или блоков, предварительно, образованных путем склеивания отдельных плит, больше высоты сечения рейки, то образующееся пустое пространство заполняется закладным элементом 6 из того же теплоизоляционного материала. К рейкам же при помощи гвоздей или шурупов 8 крепятся листы 7 сухой штукатурки (например, асбестоцементной), образующие, внутренний отделочный слой.



**Рис. 3.16 Крепление теплоизоляционного материала к ограждению**  
**а – теплоизоляция из плитных материалов**  
**б - теплоизоляция из напыляемых материал**

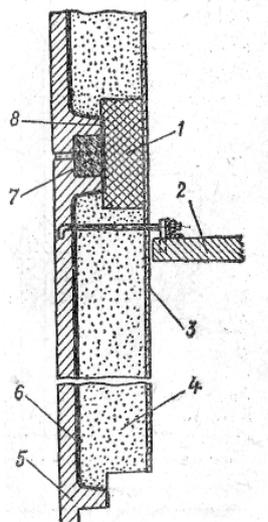
Если теплоизоляционный слой 5 (рис. 3.16, б) наносится на поверхность ограждения 1 путем напыления, то до напыления перед ограждением крепятся рейки 6 так, чтобы расстояние от изолируемой поверхности (от пароизоляционного слоя 3) до лицевой поверхности реек равнялось толщине будущего слоя тепловой изоляции. Таким образом, при напылении изоляции рейки помогают получить слой строго необходимой толщины. К этим же рейкам крепится внутренний отделочный слой сухой штукатурки 7. Для крепления реек в ограждение предварительно заделываются деревянные пробки 2, к которым также крепятся деревянные бобышки 4.

При применении засыпной изоляции или изоляционного материала, вспенивающегося в конструкции, с внутренней стороны ограждения выполняют вторую стенку (которая должна быть достаточно паропроницаемой) и между этими двумя стенками засыпают изоляционный материал или заливают исходную композицию. Для изоляции временных сооружений или небольших установок можно применять также засыпной изоляционный материал, укладывая его между двумя деревянными обшивками из двух рядов досок; между последними с теплой стороны (или с обеих сторон) укладывают пароизоляционный слой.

В случае применения достаточно прочных изоляционных материалов, таких, как пенобетон, пеностекло, арктический туф и др., материал ограждения иногда является и несущим, и теплоизоляционным. Так были выполнены ограждения, например, нескольких холодильников при мясокомбинатах, но без пароизоляционного слоя, что в ряде случаев (особенно при использовании пенобетона для изоляции низкотемпературных помещений) приводило к сильному увлажнению материала.

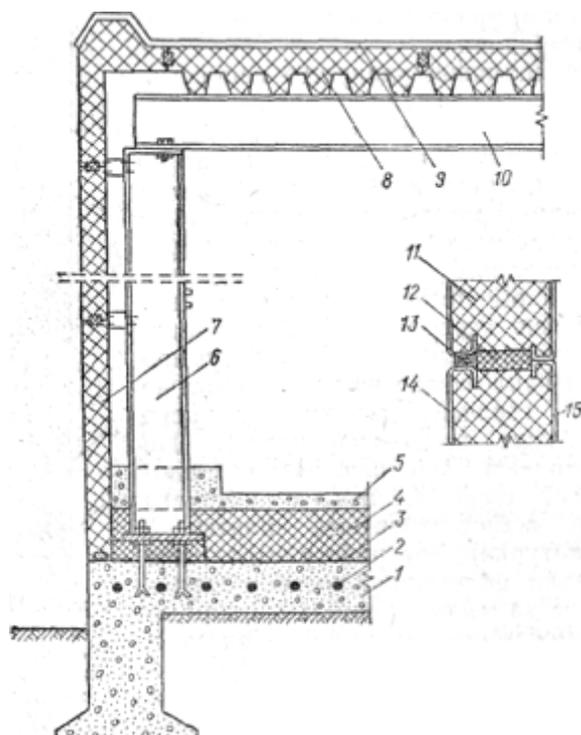
Большое внимание уделяется непрерывности изоляционного слоя при постройке холодильников из сборных элементов. Место стыка двух вертикальных панелей показано на рис. 3.17. Сборные панели для стен отечественных предприятий выполняют в виде железобетонных плит 5 в форме корыт шириной 2000 мм и длиной, соответствующей унифицированной высоте этажа холодильника. На внутреннюю поверхность панелей наносят пароизоляционный слой 6 из битумной грунтовки и наклеенного на нее с помощью битума или горячей мастики рулонного материала (чаще всего гидроизола). На пароизоляционный слой наливается теплоизоляционный слой 4, поверх которого укладывают асбестоцементные плиты 3 (сухая штукатурка). Эту работу выполняют предварительно на специально оборудованной площадке на месте строительства или на заводе железобетонных изделий. При монтаже панели крепят к перекрытию 2, а прямоугольник 7, образованный выступающими ребрами плиты панели, заливают бетоном. На место стыка наносят пароизоляционный слой 8 и по нему укладывают теплоизоляционный материал 1 заподлицо с изоляцией панели. Место стыка штукатурят или закрывают асбестоцементными

плитами. В местах стыков тепловая изоляция получается ослабленной и нередко служит очагом конденсации влаги на наружной поверхности стены и внутри изоляции.



**Рис. 3.17** Изоляция стены многоэтажного холодильника

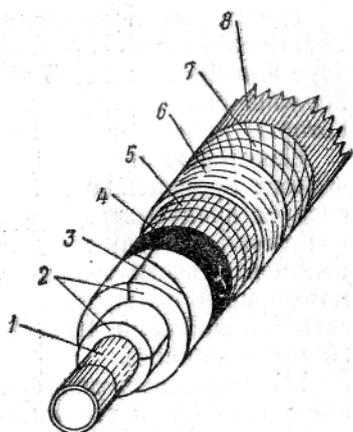
Современные одноэтажные холодильники имеют наружный каркас или внутренний (рис. 3.18), состоящий из стальных колонн 6 и балок 10 или ферм. К колоннам крепятся изолированные шитые панели 7, а на балки укладываются потолочные панели 8. Изолированные многослойные панели типа "сэндвич" имеют наружную 14 и внутреннюю 15 оболочки из стального или алюминиевого листа толщиной 0,8-1,0 мм (иногда гофрированного) и заполнены пенополиуретаном 11, имеющим коэффициент теплопроводности 0,019-0,020 Вт/(м·К). Панели выполняются шириной 1,2-1,5 м и длиной до 24 м. Они могут монтироваться или горизонтально (как показано на рисунке), или вертикально, как это делается при строительстве одноэтажных высотных холодильников.



**Рис. 3.18** Изоляция одноэтажного холодильника сборными панелями (сэндвичами)

К элементам стального каркаса плиты присоединяются крепежными деталями. В стык между панелями укладывается пенополиуретановая лента 12 (или заливается пенополиуретан), и стык закрывается эластичной замазкой 13. Железобетонная плита основания 1 холодильника обычно укладывается непосредственно на грунт (на укатанный слой гравия толщиной около 1 м). В плиту закладываются электронагреватели 2 или трубы для обогрева пола. На плиту наносится пароизоляционный слой 3, а по нему выполняется слой тепловой защиты 4. Таким образом создается непрерывность тепло- и пароизоляции вокруг всего охлаждаемого объема, причем теплоизоляционный материал в панелях оказывается хорошо защищенным от увлажнения металлическими оболочками. Последним слоем является чистый пол 5. По плитам покрытия может настилаться кровля 9. Применение легких и стандартных элементов позволяет строить холодильники такого типа даже большой емкости в короткие сроки (6 - 8 месяцев) Масса строительных и конструкционных материалов для такого холодильника примерно в десять раз меньше массы материалов, необходимых для строительства холодильника такой же площади, но выполненного традиционным способом.

Предметом особых забот должно быть обеспечение непрерывности тепловой и влажностной защиты холодных трубопроводов и аппаратов, так как опасность увлажнения теплоизоляционного материала здесь особенно велика в связи с тем, что металлическая труба является абсолютно непроницаемым пароизоляционным слоем с холодной стороны. Конструкция изоляции холодного трубопровода приведена на рис. 3.19. Изолируемую поверхность трубы тщательно очищают и покрывают слоем битума 1 для защиты ее от коррозии и для приклеивания теплоизоляционного материала 2 (на рисунке показана труба, изолируемая скорлупами в два слоя). На последний слой теплоизоляции наклеивают пароизоляционную бумагу или наносят слой холодной битумной мастики 4. По бумаге или при нанесении мастики по теплоизоляционному материалу трубопровод обматывают мягкой стальной проволокой 3 по спирали, после чего покрывают проволоочной сеткой 5, на которую наносят штукатурку 6 (асбестоцементную). Высохшую штукатурку очень целесообразно оклеить (или обмотать) мешковиной 7 и окрасить масляной краской 8. Так же тщательно должны быть закрыты торцы изоляции в местах присоединения труб к аппаратам или фасонным частям. Защиту изоляции трубопроводов, проходящих вне помещений, следует выполнять особенно тщательно; иногда для этой цели применяют металлические кожухи.



**Рис. 3.19 Конструкция изоляции холодного трубопровода**

4. Изоляционная конструкция должна по возможности восполнять недостающие качества теплоизоляционного материала.

При рассмотрении свойств теплоизоляционных материалов указывалось, что материалов, полностью удовлетворяющих всем предъявляемым к ним требованиям, не существует. Поэтому часто приходится применять материалы, наиболее доступные, даже в том случае, если они обладают и нежелательными свойствами. В таком случае изоляционной конструкции должны быть предусмотрены элементы, позволяющие уменьшить влияние этих свойств материалов на работу изоляционной конструкции. Можно показать применение этого положения на некоторых примерах.

Иногда приходится применять сгораемые или неогнестойкие материалы. Для уменьшения возможных вредных последствий от пожара изоляцию изоляционный слой разбивается на отсеки

при помощи горизонтальных и вертикальных противопожарных поясов шириной 500 мм из несгораемых изоляционных материалов, например из асбовермикулитовых или перлитогелевых плит.

В случае возникновения пожара огонь локализуется в пределах одного отсека и не сможет распространиться дальше по изоляционному слою. Обычно максимальная площадь отсека для сгораемых материалов не должна превышать  $500 \text{ м}^2$ , для трудносгораемых -  $1000 \text{ м}^2$ .

Некоторые теплоизоляционные материалы имеют недостаточную механическую прочность, и на них нельзя передавать нагрузку того или иного вида. В этом случае в изоляционной конструкции должны быть предусмотрены силовые (разгрузочные) элементы, которые примут на себя вес груза или другую нагрузку.

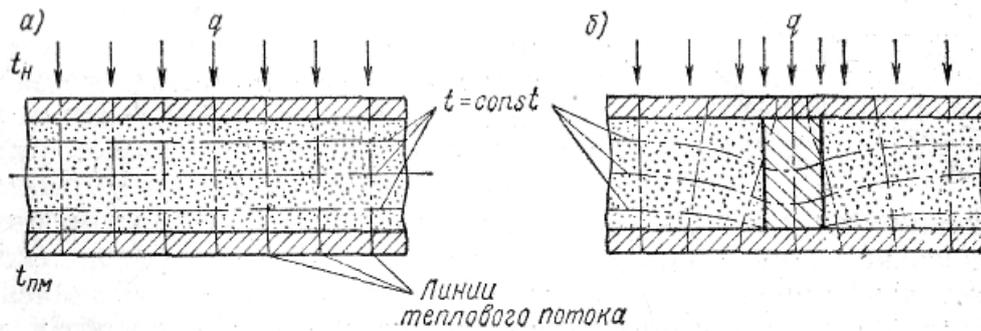
Некоторые теплоизоляционные материалы, особенно органического происхождения, разрушаются грызунами. В этом случае следует предусматривать в конструкциях элементы, которые препятствуют доступу грызунов в изоляцию. Например, по внутренней поверхности теплоизоляции стен (со стороны охлаждаемого помещения) на высоту до 70 см от пола укладывают стальную сетку с ячейками  $10 \times 10$  мм или слой стеклянной ваты (10- 20 мм толщиной).

На некоторых зарубежных холодильных установках применяют систему постоянного осушения изоляции в процессе ее эксплуатации при недостаточно хорошем слое пароизоляции или при невозможности по тем или иным причинам выполнить слой пароизоляции необходимой толщины. В этой системе парциальное давление водяного пара у холодной поверхности ограждения понижается ниже давления водяного пара в воздухе охлаждаемого помещения; таким путем можно добиться, чтобы линия давления пара  $p_x$  (например, на рис. 3.5, а), выходя из точки d, шла с таким увеличенным наклоном, который обеспечил бы ее расположение во всем ограждении ниже линии давления насыщенного пара  $p''_x$ . Достигается это тем, что у внутренней поверхности всех ограждений в изоляции прокладываются каналы с окнами (при изоляции ограждений плитами теплоизоляционного материала выдалбливают желобки в самих плитах), по которым циркулирует осушенный воздух, поглощающий влагу из изоляции. Для осушения воздух из каналов направляют в воздухоохладитель, где он охлаждается, а влага из него выпадает в виде инея на поверхности воздухоохладителя; если же такое осушение не позволяет достичь необходимой сухости воздуха, воздух пропускают через химические осушители, в которых влага поглощается адсорбентами. Подобный метод может применяться и для сушки (восстановления) увлажненной изоляции при ее ремонте.

### § 3.7.

#### **РАСЧЕТ ТЕПЛОПРИТОКОВ ЧЕРЕЗ ИЗОЛИРОВАННЫЕ ОГРАЖДЕНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ В НИХ ТЕПЛОВЫХ МОСТИКОВ**

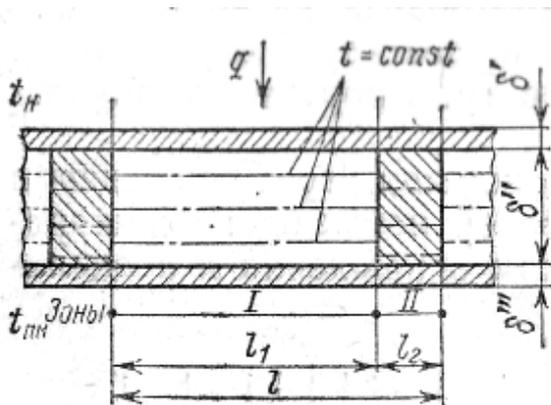
В ряде случаев при выполнении изоляционных конструкций необходимо в слое теплоизоляционного материала разместить элементы (включения), теплопроводность которых значительно выше теплопроводности теплоизоляционного материала. Наличие такого рода конструктивных элементов связано с недостаточной механической прочностью теплоизоляционного материала или с необходимостью усиления прочности и жесткости ограждения. Последнее особенно часто встречается в транспортных холодильных установках.



**Рис. 3.20** Линия теплового потока и изотермические поверхности в изолированном ограждении

Все предыдущие расчеты теплопрохождения через ограждения строились на предположении, что тепловой поток идет по направлению, перпендикулярному поверхности ограждения и с одинаковой плотностью, а линии теплового потока параллельны друг другу. По этой причине изотермические поверхности в ограждении оказывались параллельными поверхности ограждения (рис. 3.20, а). Включение в слой теплоизоляционного материала элементов с более высокой теплопроводностью вызывает в них концентрацию теплового потока, а такие искривление линий потока, поэтому искривляются и изотермические поверхности (рис. 3.20, б). Искривление происходит не только в самом включении, но распространяется и на соседние к нему участки теплоизоляционного материала, и оно тем больше, чем значительнее отличаются друг от друга коэффициенты теплопроводности теплоизоляционного материала и материала включения. Если коэффициент теплопроводности материала включения не слишком значительно (примерно до 10 раз) отличается от коэффициента теплопроводности теплоизоляционного материала, то вычисление коэффициента теплопередачи можно упростить, придав изотермам, более простой характер протекания, но отличающийся от действительного. Применяются два способа расчета такого рода конструкций.

По первому способу изоляционную конструкцию разбивают на зоны мысленными, абсолютно нетеплопроводными и бесконечно тонкими перегородками (мембранами), перпендикулярными поверхности ограждения (рис. 3.21; зоны I и II). Таким образом, каждая зона должна включать однородную часть конструкции, а вся конструкция оказывается состоящей из параллельно включенных проводников теплоты. Изотермические поверхности в каждой зоне параллельны поверхности ограждения, но смещены по отношению к соседней зоне, поскольку в более теплопроводном элементе происходит уплотнение линий теплового потока.



**Рис. 3.21** Изотермические поверхности в ограждении при расчете по первому способу

При параллельном включении проводников теплоты общее количество теплоты, проходящее через ограждение, равняется сумме количеств теплоты, проходящих через каждую зону. Для каждой из зон определяют коэффициент теплопередачи. Все величины, относящиеся к той или иной зоне, принято отличать подстрочным индексом, соответствующим данной зоне, а величины,

относящиеся к слоям, - надстрочным индексом. Величины, относящиеся ко всему ограждению, обозначают буквами без индексов (кроме коэффициента теплопередачи, который имеет обозначение способа, по которому он найден). Так, для первого способа

$$(3.29) \quad Q = k_{1cn} F(t_n - t_{пм})$$

По условию первого способа

$$(3.30) \quad Q = Q_1 + Q_2 + \dots = k_1 F_1(t_n - t_{пм}) + k_2 F_2(t_n - t_{пм}) + \dots ;$$

$$k_1 = 1 / (1/\alpha_n + \delta'/\lambda'_1 + \delta''/\lambda''_1 + \dots + 1/\alpha_{пм})$$

$$k_2 = 1 / (1/\alpha_n + \delta'/\lambda'_2 + \delta''/\lambda''_2 + \dots + 1/\alpha_{пм})$$

здесь  $F_1$  и  $F_2$  – площади зон.

Разделив (3.30) на (3.29), можно получить

$$(3.31) \quad k_{1cn} = k_1 (F_1/F) + k_2 (F_2/F) + \dots$$

Если конструкция ограждения не меняется в направлении, перпендикулярном плоскости чертежа, то можно вычислить коэффициент теплопередачи ограждения для полосы шириной в 1 м. Тогда

$$(3.31a) \quad k_{1cn} = k_1 (l_1/l) + k_2 (l_2/l)$$

По второму способу ограждение мысленно делят на слои абсолютно теплопроводными перегородками (мембранами), Параллельными поверхности ограждения. По абсолютно теплопроводным мембранам тепловой поток, переходящий из одного слоя в другой, перераспределяется, направляясь в основном по наиболее теплопроводному участку. В каждом слое линии теплового потока параллельны друг другу, но тепловой поток в нем движется независимо от того, как он шел в предыдущем. В расчете по этому способу предполагается, что ограждение представляет собой ряд последовательно включенных термических сопротивлений, вследствие чего общее термическое сопротивление ограждения равно сумме термических сопротивлений отдельных слоев. Общее термическое сопротивление

$$(3.32) \quad R_{2cn} = R_n + R' + R'' + \dots + R_{пм}$$

Здесь каждый слой, состоящий из разнородных материалов (например, второй слой на рис. 3.21), можно рассматривать как соответствующее количество проводников, включенных параллельно. В таком случае общая проводимость слоя равна сумме проводимостей каждой ветви, т.е.  $1/R' = 1/R'_1 + 1/R'_2 + \dots$ ;  $1/R'' = 1/R''_1 + 1/R''_2 + \dots$  и т.д. По существу, для слоя, состоящего из нескольких материалов, вводится понятие эквивалентного коэффициента теплопроводности  $\lambda_{экр}$ , равного сумме коэффициентов теплопроводности материалов слоя, взятых пропорционально площади, занимаемой материалом в слое, т. е. для второго слоя  $\lambda''_{экр} = \lambda''_1(F_1/F) + \lambda''_2(F_2/F)$ . Тогда  $R'' = \delta'' / \lambda''_{экр}$ , а

$$(3.33) \quad R_{2cn} = 1/\alpha_n + \delta' / [\lambda'_1(F_1/F) + \lambda'_2(F_2/F)] + \delta'' / [\lambda''_1(F_1/F) + \lambda''_2(F_2/F)] + \dots + 1/\alpha_{пм}$$

Коэффициент теплопередачи ограждения  $R_{2cn} = 1 / R_{2cn}$ . Первый способ дает преуменьшенное значение коэффициента теплопередачи, поскольку при этом способе в ограждении предполагается наличие абсолютно нетеплопроводных перегородок, исключая влияние теплопроводных элементов на теплоизоляционный материал, в то время как второй способ дает преувеличенные результаты, так как в ограждение вводятся предположительно элементы абсолютно теплопроводные. В приближенных расчетах можно ограничиваться определением по первому способу, как наиболее приближающемуся к действительной физической картине процесса. Иногда для уточнения при заметной разнице между коэффициентами, полученными по обоим способам,

за расчетное значение коэффициента теплопередачи ограждения принимают среднее арифметическое из значений, полученных по первому и второму способам, т. е.  $k = (R_{1cn} + R_{2cn})/2$ .

Оба рассмотренных способа дают результаты, очень отличающиеся друг от друга и от действительного значения коэффициента теплопередачи в случае наличия в ограждении элементов (включений), выполненных из материалов (например, из стали), теплопроводность которых значительно отличается от теплопроводности теплоизоляционного материала (коэффициент теплопроводности стали в 1000 раз больше коэффициента теплопроводности пенополистирола).

Для определения коэффициента теплопередачи изолированного ограждения, включающего такого рода металлические элементы, предложено несколько методов. Одним из распространенных способов является метод, разработанный Е. Б. Иоэльсоном и А. Е. Ниточкиным для расчета судовой изоляции. Этот метод представляет собой уточнение первого способа и позволяет в определенной степени учесть концентрацию линий теплового потока, вызванную наличием элементов с высокой теплопроводностью. Как и в первом способе, конструкцию разбивают нетеплопроводными перегородками (мембранами) на зоны, не только однотипные, но и со своим, присущим им характером направления линий теплового потока. В этом методе пренебрегают термическими сопротивлениями теплоотдачи у поверхностей ограждения и термическими сопротивлениями стальных обшивок и стальных элементов конструкции (набора). В связи с этим температуру обшивки и стальных элементов (включений) считают равной температуре наружного воздуха. Основной предпосылкой метода является предположение, что линии теплового потока, идущие от боковых поверхностей стальных элементов конструкции через изоляционный материал, являются дугами окружностей. По этой причине рассматриваемый метод называют методом круговых потоков.

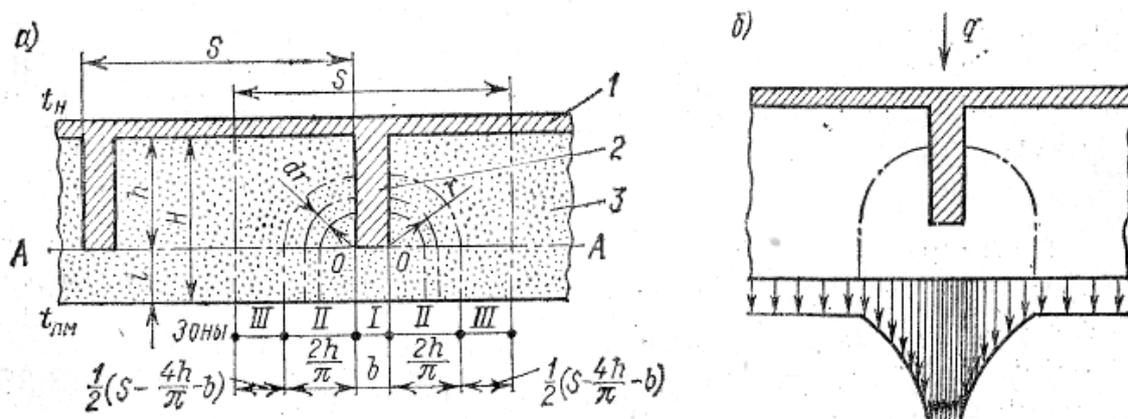


Рис. 3.22 Изолированное ограждение с металлическими ребрами

На рис. 3.22, а показана конструкция ограждения с металлической обшивкой 1 и ребрами 2 шириной  $b$  и высотой  $h$ . В ограждении применен изоляционный материал 3 с  $\lambda_{из}$ . Расчет коэффициента теплопередачи ограждения обычно ведется для полосы шириной в 1 м. При разбивке ограждения на зоны прежде всего выделяется зона I шириной  $b$  (площадью  $F = lb \text{ м}^2$ ), находящаяся под стальным элементом конструкции. Линии теплового потока здесь перпендикулярны основанию ребра  $b$ . Термическое сопротивление первой зоны  $R_1 = i / \lambda_{из}$

Секундное количество теплоты (Вт), проходящее через первую зону,

$$Q_1 = F_1(t_H - t_{лм}) / R_1 = \lambda_{из} b \Delta t / i.$$

В целях некоторого упрощения расчета целесообразно для каждой зоны вычислять ее теплопроводимость, т. е. произведение коэффициента теплопередачи зоны на ее площадь:  $K_i = k_i F_i$ . Эта величина представляет собой количество теплоты, проходящее через зону при разности температур по сторонам ограждения в 1 К. Так как  $K_i = Q_i / \Delta t_i$ , то теплопроводимость первой зоны (Вт/К)

$$(3.34) \quad K_1 = \lambda_{из} b / i.$$

За зону II принимают участки, на которые распространяется влияние искривления линий теплового потока из-за наличия стального ребра. Метод круговых потоков предполагает, что линии теплового потока в этой зоне, идущие от боковых поверхностей ребра, представляют собой дуги окружностей, проведенных радиусом  $r$  из центра, находящегося в ближайшем углу ребра (точки  $O$  на рисунке). От границы ребер (прямая  $AA$ ) линии теплового потока становятся перпендикулярными поверхности ограждения.

Элементарная теплопроводимость участка зоны II шириной  $dr$  может быть вычислена с учетом того, что путь теплового потока по дуге равен одной четвертой части длины окружности

$$(3.36) \quad dK_2 = dr / [i/\lambda_{из} + \pi r/(2\lambda_{из})] = \lambda_{из} dr/(i + \pi r/2).$$

Теплопроводимость зоны II может быть получена путем интегрирования уравнения (3.35) от  $r_{min}$  до  $r_{max}$ . Минимальный радиус дуги  $r_{min} = 0$ . Максимальный радиус  $r_{max}$  находится из тех соображений, что тепловой поток пойдет по пути наименьшего сопротивления и, следовательно, самый длинный путь по дуге окружности не может превышать длину пути по перпендикуляру от поверхности слоя I до прямой  $AA$ , т. е.  $\pi r_{max}/2 = h$  или  $r_{max} = 2h/\pi$ .

Так как зона II состоит из двух участков пути круговых потоков, то полная теплопроводимость этой зоны

$$K_2 = 4 (\lambda_{из}/\pi) \ln [(i + h)/i]$$

Площадь зоны III получается вычитанием площади зон I и II из общей площади рассматриваемого участка ограждения  $F_3 = S - b - 4h/\pi$ . Следует заметить, что цилиндрические поверхности радиуса  $r_{max}$  представляют собой воображаемые нетеплопроводные мембраны, отделяющие зону II от зоны III на этом участке.

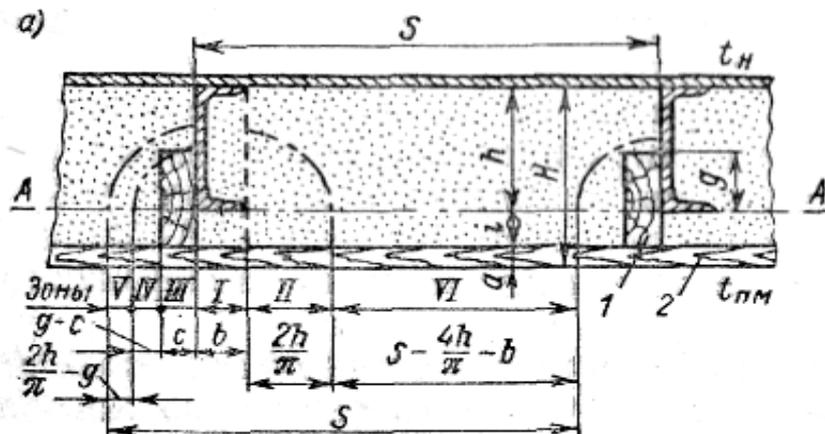
Теплопроводимость зоны III

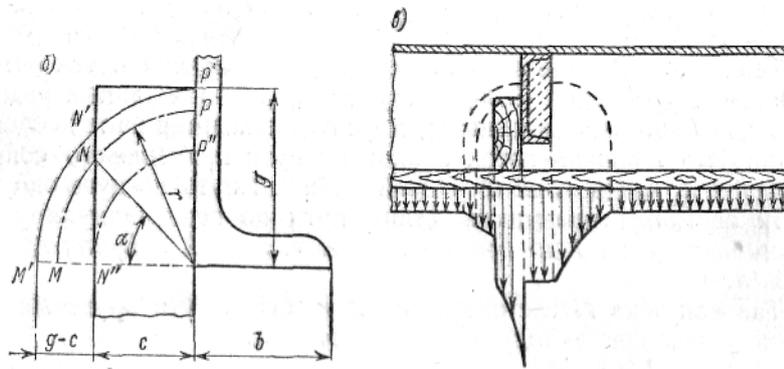
$$(3.36) \quad K_3 = \lambda_{из} F_3 / H = \lambda_{из} (S - b - 4h/\pi)/H$$

Коэффициент теплопередачи ограждения

$$(3.37) \quad k = (K_1 + K_2 + K_3)/F \quad \text{или} \quad k = (\lambda_{из}/S) \{ b/i + (4/\pi) \ln [(i + h)/i] + (S - b - 4h/\pi)/H \}$$

Интенсивность теплового потока, вычисленная по найденным зависимостям для такой изоляционной конструкции, показана на рис. 3.22, б. Здесь видны значительная интенсивность проникновения теплоты в месте расположения ребра и постепенное ее понижение в зоне, на которую распространяется влияние искривления линий теплового потока. Наименьшее значение интенсивности теплового потока соответствует коэффициенту теплопередачи ограждения без тепловых мостиков.





**Рис. 3.23** Нормальная конструкция судовой изоляц

Нормальная конструкция судовой изоляции охлаждаемых помещений обычно включает в себя еще деревянные бруски 1, к которым крепится внутренняя, большей частью деревянная, обшивка 2 (рис. 3.23, а), Коэффициент теплопроводности деревянных элементов обозначен  $\lambda_d$ .

Появление дополнительных конструктивных элементов в ограждении увеличивает число расчетных зон. Зона I остается без изменений и включает в себя область под полкой стального элемента

$$(3.38) \quad K_1 = b / (i / \lambda_{из} + \alpha / \lambda_d) = \lambda_{из} b / (i + \alpha \lambda_{из} / \lambda_d)$$

Зона II соответствует половине зоны II предыдущего случая

$$K_2 = \int_0^{2h/\pi} dr / [\pi r / (2\lambda_{из}) + i / \lambda_{из} + \alpha / \lambda_d] = (2/\pi) \ln[(h/\lambda_{из} + i/\lambda_{из} + \alpha/\lambda_d) / (i/\lambda_{из} + \alpha/\lambda_d)]$$

Окончательно

$$(3.39) \quad K_2 = (2\lambda_{из}/\pi) \ln [(h + i + \alpha \lambda_{из} / \lambda_d) / (i + \alpha \lambda_{из} / \lambda_d)]$$

Зона III представляет собой путь теплового потока по деревянному бруску; для нахождения теплопроводности можно интегрировать уравнение (3.35), подставляя в качестве верхнего предела радиус, равный толщине бруска  $c$ ,

(3.40)

$$K_3 = \int_0^c \lambda_d dr / (\pi r / 2 + i + \alpha) = (2\lambda_d / \pi) \ln[(\pi c / 2 + i + \alpha) / (i + \alpha)]$$

Зона IV образует смешанный круговой путь теплоты сначала по дереву, а затем по теплоизоляционному материалу. Ширина этой зоны  $g-c$ . Интегрирование уравнения (3.35) выполняется в пределах от  $c$  до  $g$ . Для вычисления длины кругового пути по дереву и теплоизоляционному материалу можно воспользоваться тем, что длина дуги окружности равна произведению радиуса на величину центрального угла. На рис. 3.23, б зона IV показана в увеличенном масштабе. Длина кругового пути в изоляционном материале изменяется от 0 при  $r = c$  до  $N'M'$  при  $r = g$ . Размер текущей дуги  $NM = r\alpha = r \arccos(c/r)$ . Длина кругового потока в дереве изменяется от  $P''N''$  при  $r = c$  до  $P'N'$  при  $r = g$ . Длина текущей дуги  $PN = r(\pi/2 - \alpha) = r \arcsin(c/r)$ . Теперь можно написать выражение для теплопроводности зоны IV

$$K_4 = \int_c^g dr / [(r/\lambda_o) \arcsin(c/r) + (r/\lambda_{из}) \arccos(c/r) + i/\lambda_{из} + \alpha/\lambda_o]$$

Так как численное значение количества теплоты зоны IV относительно невелико, то нет нужды в решении этого интеграла. С достаточной для практики точностью можно вычислять тепло-проходимость по дуге среднего радиуса  $r_{cp} = (c + g)/2$ . Тогда

$$(3.41) \quad K_4 = \lambda_{из}(g - c) / \{[(c + g)/2] [(\lambda_{из}/\lambda_d) \arcsin(2c/(c + g)) + \arccos(2c/(c + g)) + i + \alpha \lambda_{из}/\lambda_d]\}$$

Зона V является остаточной зоной круговых потоков. Она имеет ширину  $2h/\pi - g$  и может оказаться только в том случае, если  $2h/\pi > g$ . Для вычисления теплопроводности этой зоны также можно воспользоваться численным значением длины пути по дуге среднего радиуса зоны  $r_{cp} = (2h/\pi + g)/2 = h/\pi + g/2$ . В этом случае длина кругового пути

$$(\pi/2)(h/\pi + g/2) = h/2 + \pi g/4.$$

Тогда

$$(3.42) \quad K_5 = \lambda_{из} (2 h/\pi - g) / (h/2 + \pi g/4 + i + \alpha \lambda_{из} / \lambda_d).$$

При вычислении  $K_5$  пренебрегают наличием выступа деревянного бруска над дугой N'P' из-за малого его влияния.

Наконец, остается зона VI, являющаяся областью неискаженного теплового потока. Она имеет ширину  $S - b - 4 h/\pi$ , а ее теплопроводимость

$$(3.43) \quad K_6 = \lambda_{из} (S - b - 4 h/\pi) / (h + i + \alpha \lambda_{из} / \lambda_d)$$

Коэффициент теплопередачи ограждения

$$(3.44) \quad k = \Sigma K_i / S = (K_1 + K_2 + \dots + K_6) / S$$

Примерная интенсивность теплового потока в различных зонах ограждения показана на рис. 3.23, в. Обращает на себя внимание резкое увеличение теплового потока в месте примыкания деревянного бруска к стальному элементу.

Допущения, какие сделаны в методе круговых потоков, приводят к некоторым отклонениям расчетных величин от действительных, так как процесс теплопрохождения через рассматриваемые конструкции значительно сложнее его упрощенного представления методом круговых потоков. Оказывают влияние и мелкие, не учитываемые расчетом тепловые мостики (например, различные крепежные детали), наличие швов в теплоизоляционном слое и ухудшение качества изоляционной конструкции в условиях различных деформаций, каким подвергаются элементы корпуса судна. Влияние сделанных допущений различно. Пренебрежение термическими сопротивлениями теплоотдачи к поверхностям ограждений и термическими сопротивлениями металлических частей конструкции увеличивает расчетный коэффициент теплопередачи против действительного значения. В то же время внесение в конструкцию предполагаемых нетеплопроводных перегородок между зонами преуменьшает результат расчета. Нередко коэффициент теплопередачи, полученный методом круговых потоков, увеличивают на 20%, полагая таким образом компенсировать вероятную погрешность метода. Не соответствует действительности и допущение о равенстве температуры стальных частей конструкции температуре наружного воздуха. Несомненно, что температура стальных включений в изоляцию ниже температуры наружного воздуха, в ряде случаев это обстоятельство является причиной конденсации водяного пара из воздуха на наружной обшивке судов-холодильников в местах примыкания к ней стальных ребер (стального набора). Ввиду сложности действительной картины процесса в ответственных случаях производят проверочные испытания отдельных участков изоляционной конструкции в натуральную величину или их моделей в условиях ожидаемых температур. Хорошие результаты, особенно в случаях сложной конфигурации металлических элементов, дает применение экспериментального метода электротепловых аналогий.

### § 3.8.

## НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ПРОИЗВОДСТВА ИЗОЛЯЦИОННЫХ РАБОТ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ИЗОЛИРОВАННЫХ ОГРАЖДЕНИЙ

Тщательное выполнение работ по изоляции ограждений является одним из главных условий долговечности и надежности изоляционной конструкции. Изоляционные работы всегда являются скрытыми, так как установить качество их выполнения после окончания работ оказывается практически невозможным ввиду того, что элементы конструкции, требующие наибольшей тщательности выполнения, оказываются закрытыми последующими слоями ограждения. Поэтому при выполнении изоляционных работ должна производиться промежуточная (пооперационная) приемка подготовленной под изоляцию поверхности, нанесенного слоя пароизоляции и затем слоя теплоизоляции. Каждый последующий слой разрешается выполнять после приемки предыдущего.

При освидетельствовании обмазочной пароизоляции, которая наносится не менее чем в два слоя, проверяется одинаковость толщины слоя в различных местах поверхности, непрерывность слоя, плотность его прилегания к поверхности, тщательность выполнения слоя в местах прохода трубопроводов или каких-либо других деталей через пароизоляцию. При осмотре наклеенной пароизоляции, кроме того, проверяется герметичность стыков, выполняемых с перекрытием полотнищ, и отсутствие острых углов и переломов в местах сочленения поверхностей.

Во время осмотра теплоизоляции проверяют соответствие изоляционной конструкции проекту, соответствие толщины слоя теплоизоляции проектному размеру, плотность наклейки штучных материалов, перекрытие швов, тщательность заделки швов, правильность поверхности. При производстве работ следует наблюдать за тем, чтобы при наклейке теплоизоляционного материала не образовывался промежуточный пароизоляционный слой.

Большое значение имеет правильная эксплуатация изоляционных конструкций. Прежде всего необходимо следить за состоянием ограждений и принимать меры к немедленному их ремонту. Течи в кровлях, трещины в наружных стенах часто оказываются причиной увлажнения изоляции. Следует также вести наблюдение за состоянием ограждений и с внутренней стороны здания. Повреждения поверхности ограждений (например, тележками) должны немедленно устраняться. Не следует нарушать установленный температурный режим в охлаждаемом помещении. Длительное и значительное повышение температуры в помещении при наличии пароизоляционного слоя с наружной стороны в зимнее время может вызвать конденсацию влаги в ограждении, так как пароизоляционный слой в данном случае окажется с холодной стороны изоляции. Значительное понижение температуры в помещении также может вызвать появление зоны конденсации в изоляции, так как сопротивление имеющегося пароизоляционного слоя может оказаться недостаточным при увеличившейся разности парциальных давлений пара. При таком понижении температуры из-за недостаточно низкого, не соответствующего увеличенной разности температур коэффициента теплопередачи ограждения, на наружной поверхности ограждения может конденсироваться водяной пар из воздуха. Поэтому существенному понижению температуры в охлаждаемом помещении должно обязательно предшествовать необходимое изменение изоляционной конструкции.

Для наблюдения за состоянием изоляции желательны регулярная проверка коэффициента теплопередачи ограждений измерителями тепловых потоков и регулярная проверка влажности изоляционных материалов путем взятия проб из сомнительных мест. Сравнение результатов проверки изоляции с расчетными величинами или с данными предыдущих испытаний дает основание для суждения о качестве изолированного помещения и о происшедших изменениях свойств теплоизоляционного и пароизоляционного материалов,

## РАСЧЕТ ТЕПЛОПРИТОКОВ В ОХЛАЖДАЕМЫЕ ПОМЕЩЕНИЯ

### § 4.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Расчет теплопритоков состоит в последовательном учете количеств теплоты, поступающих в охлаждаемое помещение (в охлаждаемый аппарат) от каждого из различных источников теплоты, которые могут оказать влияние на установление и поддержание заданного теплового режима в охлаждаемом объекте. Конечной целью расчета теплопритоков является нахождение для каждого охлаждаемого помещения производительности камерного холодильного оборудования, достаточного для отвода всей поступившей теплоты и для поддержания тем самым заданных температурных условий воздушной (или иной) среды внутри этого помещения (аппарата). Кроме того, расчет теплопритоков позволяет найти холодильную мощность оборудования машинного отделения, необходимую для поддержания заданной температуры во всех охлаждаемых помещениях (аппаратах), имеющих на предприятии. Поскольку в задачу расчета входит определение производительности охлаждающих приборов (а затем и площади их поверхности) для каждого охлаждаемого помещения, то это заставляет выполнять расчет теплопритоков отдельно по каждому помещению (аппарату), что при проектировании больших предприятий оказывается довольно трудоемким. Поэтому расчет теплопритоков выполняют обычно путем сведения всех расчетных данных в таблицы. Значительное ускорение расчета получается при использовании ЭВМ.

В установившемся состоянии в охлаждаемое помещение будут проникать, и возникать внутри самого помещения (аппарата) следующие виды теплопритоков: 1) теплоприток от окружающей среды  $Q_1$ , вызванный проникновением теплоты через ограждения; 2) теплоприток от продуктов (грузов)  $Q_2$  при их термической обработке или выделение теплоты при совершении реакций; 3) теплоприток с наружным воздухом  $Q_3$  при вентиляции помещений; 4) эксплуатационные (прочие) теплопритоки  $Q_4$  от различных источников. Сумма всех теплопритоков  $Q = \sum Q_i$  в данный момент времени определяет тепловую нагрузку на холодильное оборудование.

Важнейшей особенностью теплопритоков, накладывающей отпечаток на весь ход расчета, является непостоянство их во времени. Все теплопритоки непрерывно изменяются и в общем случае без достаточной закономерности. Однако теплопритоки  $Q_1$  и  $Q_3$ , обусловленные влиянием наружной окружающей среды, меняются в связи с сезонными и суточными колебаниями температуры и влажности атмосферного воздуха. В свою очередь, величина  $Q_2$  зависит от сезонности поступления грузов или от графика нагрузки на аппараты (реакторы). Другая особенность теплопритоков состоит в том, что их максимальные значения по времени, как правило, не совпадают и могут наблюдаться в разное время суток или года.

Поскольку при машинном охлаждении расходуется механическая энергия, которую трудно аккумулировать в большом количестве, то холодильная установка машинного охлаждения только тогда будет способна отвести все теплопритоки, если ее мощность будет определена по самому неблагоприятному из всех возможных сочетаний. Для того чтобы выбрать этот случай, необходимо составить годовые графики теплопритоков от всех источников, сложить теплопритоки, соответствующие одному и тому же моменту времени, и отыскать такой период (или момент), которому отвечает наибольшая сумма теплопритоков и который окажется, таким образом, наиболее напряженным периодом для всего холодильного оборудования. Такой период может быть назван расчетным периодом, а максимальная сумма теплопритоков (но в общем случае не сумма максимальных значений) - расчетной тепловой нагрузкой, по которой и подбирается или рассчитывается холодильное оборудование. Выбор расчетного периода можно провести и более просто, исходя из следующих соображений. Во-первых, из всех теплопритоков наибольшее численное значение имеют первые два:  $Q_1$  и  $Q_2$  (а на многих предприятиях химической промышленности все другие теплопритоки очень малы по сравнению с  $Q_2$ ). Поэтому достаточно найти период, которому соответствует максимальная сумма этих двух теплопритоков. Во-вторых, что касается теплопритоков со стороны наружного воздуха ( $Q_1$  и  $Q_3$ ), то очевидно, что их максимальное значение совпадает с наиболее жарким временем года в данной местности. Колебания теплопритока  $Q_2$  определяются грузооборотом или графиком нагрузки предприятия. В частном случае максимальные значения обоих теплопритоков могут приходиться на один период времени (рис. 4.1, а). В этом случае расчетный период совпадает с наиболее жарким временем года, а расчетная нагрузка может быть вычислена путем суммирования максимальных значений

теплопритоков:  $Q_{\text{расч}} = Q_{1\text{max}} + Q_{2\text{max}}$ . При несовпадении по времени максимальных значений теплопритоков (рис. 4.1,б) расчетная нагрузка, равная максимальной сумме теплопритоков  $Q_{\text{расч}} = (Q_1 + Q_2)_{\text{max}}$  в расчетный период  $Z_{\text{расч}}$ , окажется меньше суммы максимальных значений теплопритоков  $Q_{1\text{max}} + Q_{2\text{max}}$

Принятие этой последней суммы за расчетную нагрузку в таком случае привело бы к завышению мощности устанавливаемого холодильного оборудования. Расчетный период будет определяться местоположением максимальной суммарной ординаты на графике,

В устройствах безмашинного охлаждения расходуется охлаждающее вещество, и каждая единица проникающей теплоты вызывает соответствующий расход охлаждающего вещества. Оно в данном случае является аккумулятором энергии. Поэтому целью расчета теплопритоков в этом случае является определение суммарного количества подводимой к охлаждаемому объекту теплоты за определенное время и нахождение количества охлаждающего вещества, которое должно быть запасено, чтобы обеспечить охлаждение объекта в течение этого же периода времени.

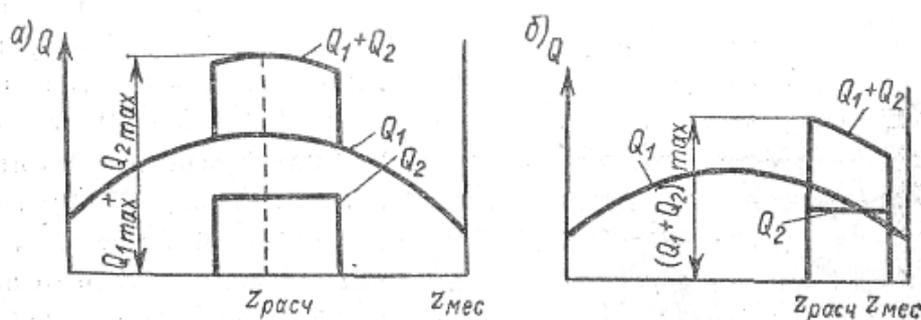
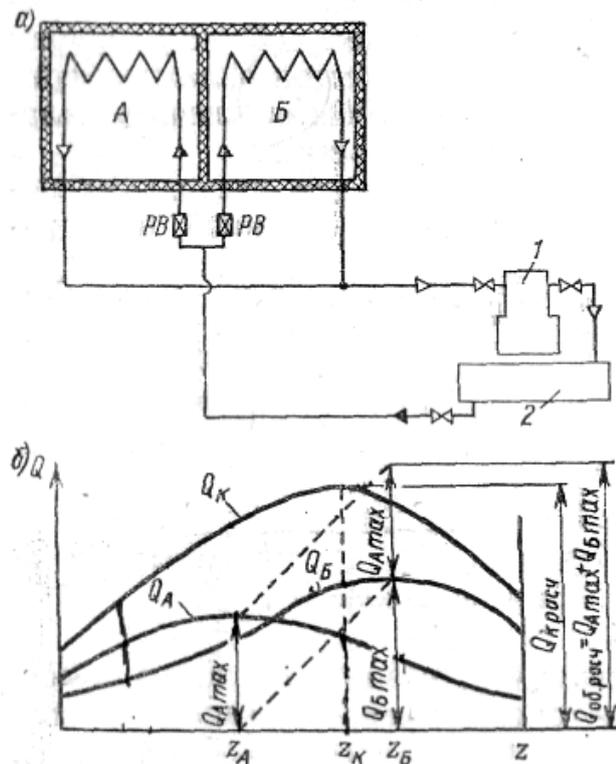


Рис. 4.1. Нахождение расчетного периода

При выполнении расчета теплопритоков для нескольких помещений, охлаждаемых одной холодильной машиной (или несколькими параллельно работающими), возникает еще одна особенность теплопритоков, из которой вытекает разница между расчетными нагрузками на камерное (местное) оборудование и оборудование машинного отделения или, как обычно говорят, на компрессор. Под расчетной нагрузкой на камерное (местное) оборудование понимают величину теплопритоков, определяющую необходимую производительность этого оборудования и его теплопередающую поверхность. Под расчетной нагрузкой на компрессор понимают величину теплопритоков, по которой должна быть определена необходимая холодильная мощность компрессора и другого оборудования машинного отделения. Разумеется, в любой момент времени сумма количеств теплоты, отведенной рабочим телом при посредстве охлаждающих приборов из помещений А и Б (рис. 4.2, а), определяет мощность компрессора  $I$  в этот момент и тепловой поток к конденсатору 2. Иными словами, не может быть разницы между действительной нагрузкой на камерное (местное) оборудование и компрессор в любой момент времени. Изменение теплопритока к охлаждаемому объекту вызывает изменение количества пара холодильного агента, образующегося в охлаждающих приборах; суммирование действительных нагрузок на местное холодильное оборудование осуществляется объединением в компрессоре количеств пара, поступивших из охлаждающих приборов отдельных помещений, что и создает действительную нагрузку на компрессор.



**Рис. 4.2. Нахождение расчетной нагрузки на компрессор и камерное оборудование**

Причиной появления разницы между расчетными нагрузками и камерное оборудование и компрессор является возможное несовпадение по времени максимальных нагрузок на отдельные охлаждаемые помещения (аппараты). На рис. 4.2, б приведены графики теплопритоков для помещений А и Б (линии  $Q_A$  и  $Q_B$ ). Максимальные теплопритоки в эти помещения по времени не совпадают, им соответствуют моменты времени  $Z_A$  и  $Z_B$ . Сумма теплопритоков для обоих помещений в любой момент времени представляет собой действительную нагрузку на компрессор и на рисунке показана линией  $Q_K$ . Естественно в качестве расчетной нагрузки на оборудование для помещения А выбрать максимальный теплоприток в это помещение  $Q_{Amax}$ , а для помещения Б -  $Q_{Bmax}$ . В качестве же расчетной нагрузки на компрессор следует выбрать максимальную сумму теплопритоков  $Q_{K\text{ расч}} = (Q_A + Q_B)_{max}$ , соответствующую моменту  $Z_K$ . Легко видеть, что в этом случае суммарная расчетная нагрузка на оборудование охлаждаемых помещений оказалась больше, чем расчетная нагрузка на компрессор, т. е.

$$Q_{об. расч} = Q_{Amax} + Q_{Bmax} > Q_{K расч}$$

Если бы расчетная нагрузка на компрессор была выбрана как сумма расчетных нагрузок на оборудование отдельных помещений (аппаратов), то это также привело бы к завышению необходимой мощности оборудования машинного отделения. Разница между расчетными нагрузками не появилась, если бы максимальные теплопритоки в отдельных помещениях оказались в один и тот же момент времени.

Точный учет всех особенностей теплопритоков при выполнении их расчета, естественно, невозможен. Поэтому приходится встречаться с некоторыми условностями расчета, вызванными необходимостью упрощения трудоемкой работы при определении расчетных нагрузок, а также тем, что расчет ведется в предположении стационарности теплового режима, хотя действительные условия работы холодильных установок отличаются от стационарных.

## § 4.2.

### ТЕПЛОПРИТОК ОТ ОКРУЖАЮЩЕГО ВОЗДУХА ЧЕРЕЗ ОГРАЖДЕНИЯ ОХЛАЖДАЕМЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

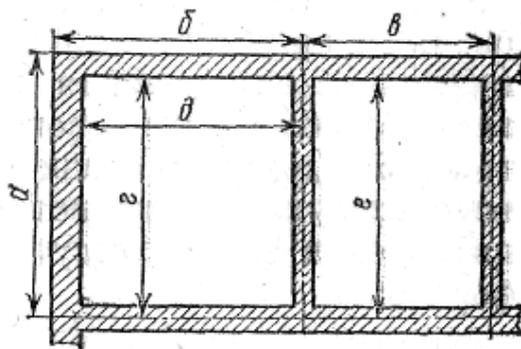
Теплота от окружающей среды проникает внутрь охлаждаемых помещений в результате действия двух процессов: 1) теплопередачи через ограждения вследствие наличия разности температур ( $t_n - t_{пм}$ ) наружной окружающей среды и воздуха внутри помещения (аппарата); 2) поглощения наружной поверхностью ограждений теплоты солнечной радиации. Поэтому

$$Q_1 = Q_{1T} + Q_{1C} \quad (4.1)$$

**Секундный теплоприток ( $Вт$ ), возникающий под влиянием разности температур.** Определяется он по выражению

$$Q_{1T} = k \times F (t_n - t_{пм}) \quad (4.2)$$

где  $k$  — коэффициент теплопередачи ограждения; численные значения его определяются по данным гл. 3;  $F$  — площадь поверхности ограждения.



**Рис. 4.3. Размеры поверхности ограждений на плане здания для расчета теплопритоков**

Общий теплоприток  $Q_{1T}$  в данное охлаждаемое помещение является суммой теплопритоков через каждое из ограждений, ограничивающих это помещение. Определение поверхности ограждений производится в соответствии со следующими указаниями:

- 1) за длину наружных стен угловых помещений принимают размер от наружной поверхности стены до оси внутренней стены (размеры  $a$  и  $b$  на рис. 4.3); длину "наружной стены неуглового помещения находят по размерам между осями внутренних стен (размер  $b$ );
- 2) за длину внутренних стен (перегородок) принимают размер или от внутренней поверхности наружных стен до оси перпендикулярных внутренних стен (размеры  $c$  и  $d$ ), или между осями внутренних стен (размер  $b$ );
- 3) длину и ширину пола и потолка определяют как длину внутренних стен (размеры  $c$  и  $d$  или  $b$  и  $e$ );
- 4) высоту стен в промежуточном этаже и первом этаже, имеющем пол, расположенный на грунте, считают от уровня пола одного этажа до пола другого, т. е. в размер высоты включается толщина перекрытия над данным помещением; в верхнем этаже - от уровня пола до верха засыпки покрытия; в первом этаже над неохлаждаемым подвалом - от уровня потолка подвала до уровня пола вышележащего этажа.

Если теплота передается через наружные ограждения, то температура  $t_n$  является расчетной температурой наружного воздуха.

Ее определение представляет значительные трудности даже в том случае, когда расчетный период установлен, например самый жаркий месяц года. Выбор в качестве расчетной температуры среднемесячной температуры приводит к недоучету возможных, довольно значительных колебаний температуры, вследствие чего в жаркие дни появятся теплопритоки, отвести которые с помощью холодильной установки оказалось бы невозможным из-за недостаточной ее мощности. Возможное влияние, которое оказывают колебания температуры наружного воздуха на состояние воздуха внутри помещений, зависит от теплоустойчивости ограждения или, иными словами, от его массивности [см. (3.5)]. Чем легче ограждение, тем быстрее и с большей амплитудой передадутся

через него к внутренней поверхности ограждения колебания температуры наружного воздуха. Напротив, в массивном ограждении температурные колебания будут затухать в большей степени и к внутренней поверхности проникать с более заметным отставанием по фазе. Таким образом, выбор расчетной температуры наружного воздуха связан с конструкцией ограждения, так как каждой конструкции могут соответствовать такие колебания температуры наружного воздуха, которые вызовут недопустимые колебания температуры на внутренней поверхности ограждения.

Для достаточно массивных ограждений, какими являются ограждения обычных холодильных сооружений, кратковременные циклические изменения температуры наружного воздуха вызывают колебания теплового потока, существенно затухающие внутри ограждения. В связи с этим за расчетную температуру наружного воздуха принимают среднюю температуру наиболее жаркой пятидневки. При отсутствии этих данных можно пользоваться формулой

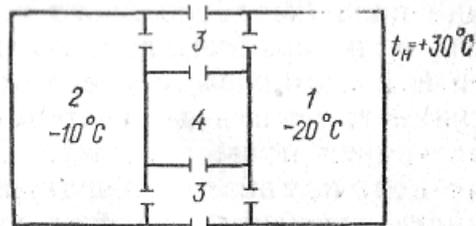
$$t_H = t_{CP \text{ мес}} + 0,25 \times t_{A \text{ м}} \quad (4.3)$$

где  $t_{CP \text{ мес}}$  - среднемесячная температура самого жаркого месяца;  $t_{A \text{ м}}$  - температура абсолютного максимума, т. е. наивысшая температура воздуха, наблюдавшаяся в данном районе.

Расчетную температуру, найденную по выражению (4.3), округляют до целого градуса. Например, для Ленинграда среднемесячная температура июля месяца  $17,5^\circ \text{C}$ , температура абсолютного максимума  $32^\circ \text{C}$ . Тогда  $t_H = 17,5 + 0,25 \times 32 = 25,5 \approx 26^\circ \text{C}$ . В качестве расчетной относительной влажности воздуха принимают среднемесячную влажность самого жаркого месяца, измеряемую в 13 ч. Что касается температуры охлаждаемого помещения  $t_{пм}$ , то она задается технологическими условиями.

При определении количества теплоты, проходящего через внутренние ограждения, отделяющие данное охлаждаемое помещение от других, охлаждаемых или отапливаемых помещений, т. е. от таких помещений, где удерживается вполне определенная температура, ее значение и подставляют в формулу (4.2) вместо температуры  $t_H$ .

При расчете теплопритоков приходится вычислять их и из неохлаждаемых и неотапливаемых помещений, температура в которых не фиксирована. Однако температура в таких помещениях самоустанавливается в результате теплоподвода со стороны наружного воздуха и теплоотвода в смежные охлаждаемые помещения и может быть вычислена из теплового баланса. Так как такие расчеты каждый раз выполнять затруднительно, то обычно пользуются установленными приближенными зависимостями. Так, для определения теплопритоков через стены из неохлаждаемых помещений, имеющих непосредственный выход наружу, за расчетную разность температур принимается 70% от расчетной разности температур для наружных стен.



**Рис. 4.4. К определению теплопритока из неохлаждаемых (и неотапливаемых) помещений**

Если неохлаждаемое помещение не имеет непосредственного выхода наружу, то за расчетную разность температур принимается 60% от разности температур для наружных стен (рис. 4.4). Между охлаждаемыми помещениями 1 и 2 расположены два неохлаждаемых вестибюля 3, имеющие выходы наружу, и неохлаждаемая экспедиция 4, непосредственно не соединяющаяся с наружным воздухом. Расчетная температура наружного воздуха  $t_H = 30^\circ$ . Таким образом, для наружных стен помещения 1 расчетная разность температур  $t_H - t_{пм} = 50^\circ \text{C}$ , а для помещения 2 она будет  $40^\circ \text{C}$ . При определении теплопритока из вестибюлей 3 в помещение 1 за расчетную разность температур будет принято  $0,7 \times 50 = 35^\circ \text{C}$ , а в помещении 2 она окажется  $0,7 \times 40 = 28^\circ \text{C}$ , для теплопритока из экспедиции 4 в помещение 1 расчетная разность температур -  $0,6 \times 50 = 30^\circ \text{C}$ , а в помещении 2 она равна  $0,6 \times 40 = 24^\circ \text{C}$ . При определении теплопритока

через пол из неохлаждаемого подвала расчетная разность температур принимается в размере 50% от разности температур для наружных стен.

Выше говорилось о малой величине плотности теплового потока, идущего из грунта. Поэтому теплоприток через полы, лежащие на грунте, считают только для помещений с отрицательными температурами. Если пол охлаждаемого помещения лежит на непучинистом грунте, то устройств для обогрева грунта не принимают и грунт под зданием может промерзнуть на некоторую глубину. В этом случае тепловой поток, как из нижних слоев грунта, так и с боковых сторон льдогрунтового массива под зданием будет вызывать только таяние льда, но не пройдет через промороженный грунт. Поэтому причиной теплопритока через полулежащий на грунте, считают проникновение теплоты от слоя грунта, имеющего температуру  $0^{\circ}\text{C}$  (от слоя с нулевой изотермой). Для средней полосы СССР глубину промерзания грунта под охлаждаемым зданием принимают приблизительно 3,5 м.

Расчетная формула этого метода определения теплопритока через пол, лежащий на грунте, имеет вид

$$Q_1 \text{ пола} = F \times t_{\text{ПМ}} / R_0 \quad (4.4)$$

где  $F$  - площадь пола помещения;  $t_{\text{ПМ}}$  - температура охлаждаемого помещения (ее абсолютное значение);  $R_0$  — общее термическое сопротивление передаче теплоты от слоя грунта с температурой  $0^{\circ}\text{C}$  воздуху помещения.

Величина  $R_0$  включает термические сопротивления теплопроводности грунта  $R_{\text{ГР}}$  под полом от уровня нулевой изотермы до строительной конструкции пола, теплопроводности  $R_{\text{П}}$  конструкции пола (изолированного или неизолированного) и теплоотдачи  $R_{\text{ПМ}}$  от поверхности пола к воздуху камеры, т. е.  $R_0 = R_{\text{ГР}} + R_{\text{П}} + R_{\text{ПМ}}$ . При расчете помещений с температурой от  $-1$  до  $-2,5^{\circ}\text{C}$  считают, что нулевая изотерма проходит непосредственно под конструкцией пола, а поэтому  $R_{\text{ГР}} = 0$ , т. е.  $R_0 = R_{\text{П}} + R_{\text{ПМ}}$ .

Если пол низкотемпературного помещения, лежащий на грунте, имеет устройство для обогрева, предохраняющее грунт от промерзания, то для любых конструкций пола с обогревом теплоприток через пол определяется по выражению

$$Q_1 \text{ пола} = F \times k_{\text{П}} \times (t_{\text{СР}} - t_{\text{ПМ}}) \quad (4.5)$$

Где  $k_{\text{П}}$  - коэффициент теплопередачи конструкции изолированного пола;  $t_{\text{СР}}$  — средняя температура слоя с нагревательным устройством.

При электрическом обогреве пола электронагревателями в бетонной плите, а также при обогреве жидкостями, протекающими по трубам, уложенным в слой бетона, или паром холодильного агента, конденсирующимся в трубах, за расчетную температуру принимают  $t_{\text{СР}} = +1^{\circ}\text{C}$ . Если применен шанцевый пол, то с учетом неравномерности температур в различных участках воздушных, каналов принимают среднюю температуру слоя с каналами  $t_{\text{СР}} = 3^{\circ}\text{C}$ .

При определении теплопритока  $Q_{\text{ГТ}}$  возникает разница между расчетными нагрузками на компрессор и камерное оборудование из-за различного отнесения на эти статьи теплопритоков через внутренние ограждения, отделяющие охлаждаемые помещения с разными температурами друг от друга. Для выяснения этой разницы рассмотрен пример расчета теплопритока в помещения 1 и 2 только через общую северную наружную стену (НСС) и через внутреннюю стену (ВС), разделяющую эти помещения (табл. 4.1). Все данные, необходимые для расчета, представлены на рис. 4.5.

Теплопритоки через наружные ограждения одинаково учитываются и на компрессор, и на оборудование. Если же обратить

Таблица 4.1

Пример расчета теплопритоков

№ помещения	$t_{\text{пм}}, ^\circ\text{C}$	Наименование ограждения	$t_{\text{н}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{н}} - t_{\text{пм}}, ^\circ\text{C}$	$k, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	$F, \text{м}^2$	$Q_{\text{т}}, \text{Вт}$	
							на компрессор	на оборудование
1	- 15	НСС ВС№2	25	40	0,30	40	480	480
			- 20	-5	0,47	30	- 70	-
Всего по помещению № 1							410	480
2	- 20	НСС ВС№ 1	25	45	0,30	30	405	405
			- 15	5	0,47	30	70	70
Всего по помещению № 2							475	475
Итого по обоим помещениям							885	955

внимание на теплоприток через внутреннюю стену между помещениями 1 и 2, то можно видеть, что для помещения 1 этот теплоприток отрицателен, так как температура этого помещения выше, чем соседнего — 2, в то время как для помещения 2 этот же теплоприток имеет положительный знак. При сложении теплопритоков отдельных помещений для получения нагрузки на компрессор теплопритоки через внутреннюю стену как одинаковые по численному значению, но имеющие различные знаки, сократятся. Таким образом, нагрузку на компрессор будут составлять только теплопритоки через наружное ограждение (НСС).

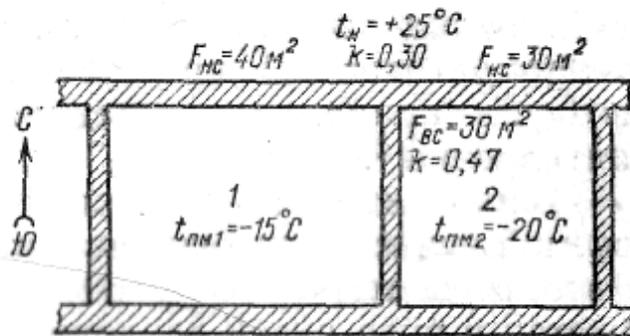


Рис. 4.5. К примеру, расчета теплопритоков через внутренние ограждения

Что касается нагрузки на камерное оборудование, то для ее определения исходят из следующих соображений. В рассматриваемый момент времени работа оборудования помещения 2 с более низкой температурой как бы помогает оборудованию помещения 1 с более высокой температурой, поскольку в низкотемпературную камеру отводится часть теплопритоков (—70 Вт); однако могут быть периоды, когда в помещении 2 не будет поддерживаться столь низкая температура, и тогда ее оборудование не будет помогать работе оборудования помещения 1. Такие периоды будут более тяжелыми для оборудования помещения 1. Поэтому отрицательные теплопритоки не включают в нагрузку на оборудование, что и сделано в табл. 4.1. В период же работы помещения 2 с повышенной температурой нагрузка на компрессор будет, наоборот, понижена.

В связи с этим при выполнении расчета теплопритоков нагрузку на компрессор следует считать по теплопритокам через наружные ограждения и через ограждения неохлаждаемых помещений,

причем этот расчет может вестись не по отдельным помещениям, а по отсекам с помещениями одинаковых температур, что упрощает ведение расчета. В нагрузку на оборудование данного помещения кроме этих теплопритоков включают положительные теплопритоки через внутренние ограждения из смежных охлаждаемых помещений. Такой расчет нагрузки на компрессор, однако, условен, так как он оказывается справедливым только в случаях, когда для охлаждения смежных помещений предусмотрен один компрессор или когда для этой цели предусмотрена группа компрессоров, работающих на одной температуре кипения. Если же для охлаждения каждого из смежных помещений имеются самостоятельные компрессоры, работающие на разных температурах кипения, то теплопритоки через внутренние ограждения войдут в нагрузку каждый на свою температуру кипения, а потому должны быть учтены.

Некоторые охлаждаемые помещения предприятий (обычно из числа имеющих температуру  $0^{\circ}\text{C}$  и выше) нуждаются в отоплении для поддержания заданных условий в зимнее время. Для таких помещений производят определение теплопотерь, которые могут быть в зимнее время, что позволяет установить необходимую производительность отопительных приборов для каждого из помещений. Метод расчета теплопотерь аналогичен методу определения теплопритоков. В качестве расчетной температуры наружного воздуха принимается средняя температура наиболее холодной пятидневки.

### Теплоприток от солнечной радиации.

Источником рассматриваемой лучистой энергии является солнце, имеющее на поверхности фотосферы температуру  $6000^{\circ}\text{C}$ . Солнечная энергия распространяется в виде лучей различной длины от  $0,02$  до  $5,0$  мкм, причем длинноволновую часть спектра представляет инфракрасное или тепловое излучение с длиной волны от  $0,75$  до  $5,0$  мкм. Спектральный состав и интенсивность солнечной радиации за пределами земной атмосферы оказываются неизменными, что позволяет характеризовать интенсивность солнечного излучения величиной. Так называемой солнечной постоянной  $J_0$  под которой понимают секундное количество теплоты (Вт), получаемое  $1\text{ м}^2$  поверхности, перпендикулярной к солнечным лучам, на границе земной атмосферы. По актинометрическим измерениям  $J_0 = 1350\text{ Вт/м}^2$ .

При прохождении через земную атмосферу изменяется как спектральный состав, так и интенсивность солнечного излучения вследствие его рассеяния и поглощения составными частями атмосферы. К поверхности земли проникает примерно половина солнечной энергии, пришедшей к границам атмосферы. В свою очередь, атмосфера излучает часть рассеянной теплоты в направлении земной поверхности. Количественный учет полной радиации, включающей прямое и рассеянное излучение, ведется при помощи величины, называемой *напряжением солнечной радиации*  $J$ , под которым понимают секундное количество теплоты (Вт), приходящееся на  $1\text{ м}^2$  поверхности. Напряжение солнечной радиации зависит от географического положения пункта, от ориентации поверхности по отношению к странам света и от угла наклона поверхности. Таблица значений расчетных напряжений солнечной радиации для летнего периода приведена в приложении 1.

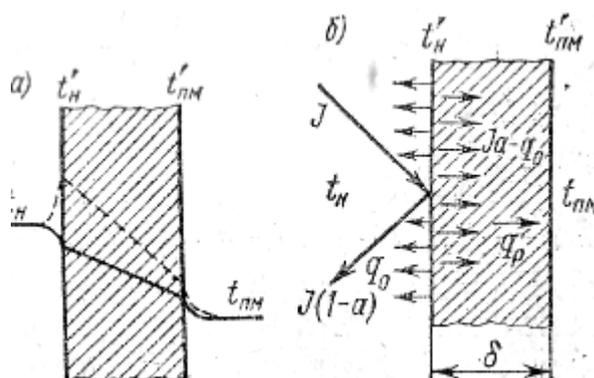


Рис. 4.6. Воздействие солнечного излучения на поверхность ограждения

Видимый эффект солнечного излучения на поверхность ограждения выражается в повышении температуры  $t_n^1$  поверхности, облучаемой солнцем, до температуры более высокой, чем температура наружного воздуха  $t_n$ . Если процесс передачи теплоты солнечного излучения через ограждение представлять стационарным, то распределение температур в ограждении при нагревании поверхности радиационной теплотой будет подобно показанному штриховой линией на рис. 4.6, а. Часть теплоты, поглощенной поверхностью ограждения, проникает через ограждение внутрь охлаждаемого помещения. Для определения этого количества теплоты можно представить себе, что некоторая поверхность ограждения (рис. 4.6, б) подвергается воздействию солнечного излучения с напряжением  $J$ . Доля радиационной теплоты поглощается поверхностью, а численное значение этой доли поглощенной теплоты зависит от цвета и степени шероховатости (состояния) поверхности и определяется коэффициентом поглощения  $a$ . Значения коэффициентов поглощения для некоторых материалов приведены в табл. 4.2.

Таким образом, количество теплоты  $J_A$  будет поглощаться поверхностью, в то время как  $J(1 - a)$  будет отражаться от поверхности. Данные, приведенные в табл. 4.2, показывают, насколько существенна окраска поверхностей ограждений охлаждаемых помещений в светлые тона для уменьшения количества теплоты, поглощаемой наружными ограждениями. Так как поверхность, нагретая солнцем, имеет температуру выше температуры наружного воздуха, то часть  $q_0$  теплоты, полученной единицей поверхности, будет передаваться окружающему воздуху  $q_0 = \alpha_n \times (t_n^1 - t_n)$

От поверхности внутрь ограждения направится тепловой поток  $J_A - q_0$ . В условиях стационарного процесса этот поток проникал бы и внутрь охлаждаемого помещения. Так как в действительности тепловой поток радиационной теплоты не может быть стационарным, то часть теплоты будет оставаться в ограждении, затрачиваясь на нагревание элементов ограждения. Для учета доли теплового потока, которая, в действительном процессе проходит через ограждение, вводится коэффициент пропускания  $p$ , равный 0,75—1,0. Тогда следует считать, что через ограждение проходит поток плотностью  $q_p = p \times (J_A - q_0)$  или  $q_p = p \times [J_A - \alpha_n \times (t_n^1 - t_n)]$ . При  $p = 1$   $q_p = J_A - \alpha_n \times (t_n^1 - t_n)$ . Для стационарного процесса в однородном ограждении можно написать такие уравнения плотности теплового потока:

$$q_p = (\lambda/\beta) \times (t_n^1 - t_{пм}^1)$$

$$q_p = \alpha_{пм} \times (t_{пм}^1 - t_{пм})$$

**Таблица 4.2 Коэффициенты поглощения для некоторых материалов**

Материал поверхности	Коэффициент поглощения $a$	Материал поверхности	Коэффициент поглощения $a$
Алюминий полированный	0,20	Краска черная	0,97 - 0,99
Асфальт	0,89	Краска белая	0,12 - 0,26
Бетон	0,68	Оцинкованное железо	0,66
Земляная засыпка на кровле	0,80	Рубероид	0,72 - 0,86
Известковая побелка	0,40	Толь	0,91
Кирпич красный	0,70 - 0,77	Штукатурка светлая	0,40
Кирпич белый	0,26	Штукатурка темная	0,57

Если в трех последних выражениях плотности теплового потока оставить справа только разности температур, а все остальные члены перенести влево и затем сложить эти уравнения, то после преобразования получим:

$$q_p = k \times (J_A / \alpha_n + (t_n - t_{пм})). \quad (4.6)$$

$$q_p = k \times (J_A / \alpha_n) + k \times (t_n - t_{пм}). \quad (4.6a)$$

Второе слагаемое выражения (4.6a) представляет собой плотность теплового потока, проходящего через ограждение под действием разности температур, т. е.  $q_{пг}$ . Следовательно, найденный поток радиационной теплоты включает в себя два тепловых потока:

$$q_p = q_{пс} + q_{пг}$$

первый из которых является результатом превышения температуры поверхности ограждения над температурой наружного воздуха и потому может быть назван избыточным потоком, вызванным действием солнечной радиации, избыточным над потоком  $q_{IT}$  который уже учтен при расчете  $Q_{IT}$ .

Поскольку плотность теплового потока  $q = k \times \Delta t$  и плотность потока  $q_{IC}$  можно представить в таком же виде, обозначив  $J_A / \alpha_H = \Delta t_C$  и назвав эту величину *избыточной разностью температур*, обусловленной действием солнечной радиации. Тогда

$$q_{IC} = k \times \Delta t_C \quad (4.7)$$

или с учетом коэффициента проницания

$$q_{IC} = p \times k \times \Delta t_C \quad (4.7a)$$

Так как коэффициент проницания часто принимают равным 0,75, а коэффициент теплопередачи со стороны наружного воздуха,  $\alpha_H = 23,3 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$ , то выражение для  $\Delta t_C$  (К) можно представить в виде

$$\Delta t_C = 0,75 \times (J_A / 23,3) \quad (4.8)$$

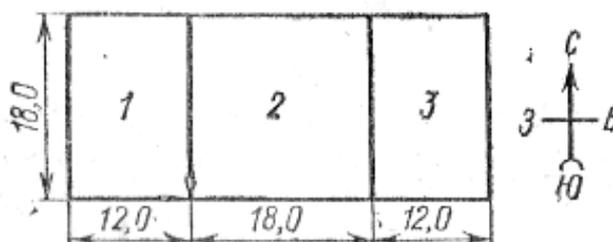
Искомое секундное количество теплоты солнечной радиации  $Q_{IC}$  (Вт), проникающее через ограждение с площадью поверхности  $F$ ,

$$Q_{IC} = k \times F \times \Delta t_C \quad (4.9)$$

Вышеприведенный метод нельзя применить для определения теплопритока от солнечной радиации через чердачные покрытия. В этом случае пользуются следующими значениями избыточной разности температур:

Географическая широта $\varphi$ °	40	50	60
Избыточная разность температур $\Delta t_C$ , К	15	10	5

Необходимо выяснить также, через какие поверхности здания следует учитывать теплоприток от солнечной радиации, имея в виду, что в течение дня все стороны здания, кроме северной, последовательно подвергаются действию солнечного излучения. Так как облучение различных сторон здания происходит в разное время дня, то естественно, что в расчет нельзя принимать теплопритоки через все облучаемые поверхности. Если здание имеет несколько охлаждаемых помещений, то в расчет нагрузки на компрессор принимают теплоприток через покрытие и теплоприток через ту наружную стену, через которую проникает наибольшее количество теплоты во все помещения в один и тот же момент времени. Таковой является стена, которой соответствует наибольшее произведение площади поверхности на расчетное напряжение солнечной радиации. В расчет нагрузки на камерное оборудование следует принимать теплоприток через ту стену, через которую от солнечной радиации проникает наибольшее количество теплоты для данного помещения, и, конечно, через покрытие, если речь идет о расчете помещения, находящегося непосредственно под покрытием. Для пояснения этого положения приведен пример определения теплопритока от солнечной радиации в здание, план которого показан на рис. 4.7. Так как южная стена здания имеет площадь поверхности значительно большую, чем поверхности других облучаемых стен, то, хотя напряжение солнечной радиации для южной стены меньше, чем для восточной и западной стен, произведение  $J \times F$  для нее наибольшее, а потому и теплоприток от солнечной радиации через южную стену окажется наибольшим для всего здания и его следует отнести на компрессор; для помещения 1 наибольшим окажется теплоприток через западную стену, а потому его необходимо отнести на камерное оборудование этого помещения. Аналогичное положение для помещения 3, где наибольшим является теплоприток через восточную стену. В помещении 2 теплопритоки от солнечной радиации на компрессор и камерное оборудование совпадают по численному значению, так как здесь солнцем облучается только южная стена.





холода. В этом случае среднее значение секундного теплопритока от обрабатываемых тел должно определяться по выражению

$$Q_2 = G^1 (i_1 - i_2) \times (\tau_{Ц}/\tau_{РБ})/(3,6 \times 24) \quad (4.11a)$$

где  $\tau_{Ц}$  - продолжительность цикла технологической обработки продукта, включающая и время на совершение вспомогательных операций;  $\tau_{РБ}$  - продолжительность рабочего периода, во время которого потребляется холод.

Для отдельных процессов количество отводимой теплоты может быть определено следующим образом.

1. При охлаждении тела

$$Q_2 = G^1 \times C_1 (t_1 - t_2)/(3,6 \times 24), \quad (4.12)$$

где  $C_1$  - теплоемкость охлаждаемого тела;  $t_1$  и  $t_2$  - температура тела соответственно до и после охлаждения.

При термической обработке продуктов, подлежащих последующему хранению при низких температурах, температуру обрабатываемых продуктов  $t_2$  целесообразно понижать до температуры  $t_{ПМ}$  при которой эти продукты будут в дальнейшем храниться с тем, чтобы не нарушать технологические условия в помещениях для хранения обрабатываемых продуктов.

2. При определении количества теплоты, отводимой при замораживании тел, процесс условно разбивается на три стадии: охлаждение тела от начальной температуры  $t_1$  до температуры  $t_{НЗ}$  начала замерзания жидкого раствора; отвердевание раствора, происходящее при постоянной температуре  $t_{НЗ}$ ; охлаждение уже замороженного тела от температуры начала замерзания жидкой фазы до средней конечной температуры процесса  $t_2$ . Таким образом,

$$Q_2 = G^1 \times (C_1 (t_1 - t_{НЗ}) + 335 \times \omega \times w + C_2 (t_{НЗ} - t_2))/(3,6 \times 24) \quad (4.13)$$

где  $w$  — относительное содержание влаги в продукте;  $\omega$  — относительное количество замороженной влаги в продукте при температуре конца процесса  $t_2$ ;  $C_2$  — теплоемкость замороженного продукта.

3. При домораживании тел

$$Q_2 = G^1 \times (335 \times w \times (\omega_2 - \omega_1) + C_2 (t_1 - t_2))/(3,6 \times 24) \quad (4.14)$$

где  $\omega_1$  — относительное количество замороженной влаги, соответствующее температуре  $t_1$  при которой продукт поступил на домораживание;  $\omega_2$  — то же при средней конечной температуре после домораживания.

Если процессы термической обработки производятся в устройствах периодического действия, то в выражения (4.12)—(4.14) должна быть внесена поправка в соответствии с (4.11a).

Все количество теплоты  $Q_2$  представляет собой нагрузку на компрессор, поскольку  $G^1$  является действительной производительностью предприятия по этому виду термической обработки. Для определения расчетной нагрузки на камерное оборудование отдельных помещений или аппаратов  $Q_2$  распределяется пропорционально их производительности. В устройствах периодического действия действительный теплоприток значительно изменяется в течение всего периода обработки. В начальный момент, когда теплый продукт загружается в помещение с низкой температурой, от продукта в единицу времени отнимается наибольшее количество теплоты, так как этому моменту соответствует наиболее высокая разность температур. По мере охлаждения (замораживания) продукта, разность температур между продуктом и охлаждающей средой убывает, в связи, с чем постепенно уменьшается и количество теплоты, отводимое в единицу времени. В то же время теплоприток  $Q_2$  выражениями (4.11)—(4.14) определен как средний за весь период термической обработки. Естественно, что оборудование, подобранное по среднему теплопритоку, не сможет отвести повышенное количество теплоты, выделяющееся в начале процесса. Поэтому на установках, рассчитанных подобным образом, сразу после загрузки теплых продуктов температура охлаждаемого помещения повышается, в результате чего продолжительность термической обработки оказывается существенно больше расчетной. Чтобы избежать подобных явлений, расчетный теплоприток на камерное оборудование целесообразно увеличивать на 30% по сравнению с полученным средним теплопритоком, т. е. считать  $Q_{2\text{об}} = 1,3 \times Q_2$ . Для создания более равномерной нагрузки на компрессор и приближения ее к расчетной желательно иметь несколько устройств для термической обработки (при устройствах периодического действия) со смещенными по времени циклами. В устройствах непрерывного действия

получается сравнительно равномерная нагрузка на оборудование, в связи, с чем внесение указанной поправки при их расчете производить не следует.

Термическую обработку предусматривают и при расчете холодильного оборудования помещений для хранения грузов (материалов) при низких температурах, если возможно поступление грузов, имеющих температуру выше (более чем на 3 К) температуры охлаждаемого помещения. В нагрузку на компрессор в этом случае включают теплоприток от охлаждаемых или замораживаемых грузов, вычисленный по максимальному суточному поступлению во все помещения, обслуживаемые компрессором (или компрессорами) данной температуры, кипения, так как величина общей нагрузки не зависит от того, в какое из помещений поступит груз. Для определения же камерного (местного) оборудования данного помещения весьма существенно, сколько поступит ежесуточно груза именно в него и насколько температура груза выше температуры помещения. Поэтому, например, для распределительных и производственных холодильников рекомендуется ограничивать суточное поступление грузов в камеры хранения грузовой емкостью до 200 т в количестве 8 % от емкости и в камеры хранения грузовой емкостью более 200 т — 6 % от емкости. Теплоприток от этого количества груза и принимается в расчет камерного оборудования.

#### § 4.4.

#### ТЕПЛОПРИТОК С НАРУЖНЫМ ВОЗДУХОМ ПРИ ВЕНТИЛЯЦИИ ПОМЕЩЕНИЙ

Вентиляцией, как известно, называется организованная замена воздуха помещения свежим наружным воздухом. Подаваемый в охлаждаемое помещение наружный воздух должен быть предварительно охлажден до температуры воздуха в помещении, а содержание в нем влаги понижено до значения, соответствующего влажности воздуха помещения.

Теплота, отводимая от наружного воздуха при такой его обработке, и составляет теплоприток  $Q_3$ .

Вентиляция охлаждаемых помещений обычно обуславливается:

- 1) необходимостью создания нормальных условий воздушной среды для людей, работающих в этих помещениях;
- 2) технологическими требованиями к состоянию воздушной среды.

В некоторых производственных помещениях с умеренно низкими температурами приходится работать относительно большому количеству людей. По санитарным нормам в такие помещения необходимо подавать наружный воздух из расчета  $20 \text{ м}^3/\text{ч}$  на одного работающего. Секундный теплоприток (Вт) от этого воздуха будет составлять

$$Q_3 = 20 \times n \times \rho_{\text{ПМ}} \times (i_{\text{Н}} - i_{\text{ПМ}})/3,6 \quad (4.15)$$

где  $n$  - число одновременно работающих людей в помещении;  $\rho_{\text{ПМ}}$  — плотность воздуха в охлаждаемом помещении;  $i_{\text{Н}}$  — энтальпия наружного воздуха (кДж/кг) при расчетных условиях;  $i_{\text{ПМ}}$  — энтальпия воздуха помещения.

Технологические нормы требуют вентиляции некоторых помещений (обычно с положительными температурами) для устранения запахов, удаления продуктов дыхания некоторых хранящихся грузов и т. п. В этом случае указывается необходимая кратность вентиляции, задаваемая числом, а обменов воздуха в сутки, которое означает, сколько раз в сутки воздух помещений должен быть полностью заменен свежим воздухом. Обычно кратность вентиляции, а принимают в пределах от одного до шести обменов в сутки. Тогда теплоприток от наружного воздуха может быть определен следующим образом:

$$Q_3 = V_{\text{СТР}} \times a \times \rho_{\text{ПМ}} \times (i_{\text{Н}} - i_{\text{ПМ}})/(3,6 \times 24) \quad (4.16)$$

где  $V_{\text{СТР}}$  — строительный объем вентилируемого помещения.

Теплоприток  $Q_3$  учитывается полностью и на оборудование, и на компрессор.

#### §.4.5.

#### ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ТЕПЛОПРИТОКИ ОТ РАЗЛИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Кроме перечисленных основных теплопритоков встречаются и другие теплопритоки, в частности, связанные с обслуживанием охлаждаемых помещений, с работой вентиляторов, с производством погрузочно-разгрузочных работ и т. п. В каждом конкретном случае приходится рассматривать возможные источники теплопритоков. Некоторые из них разобраны ниже.

**Теплоприток от электрического освещения  $Q_4^1$ .** Электрическая энергия, подводимая к светильникам, полностью превращается в теплоту. Поэтому, если  $N_{СВ}$  — мощность светильников (Вт), находящихся в охлаждаемом помещении, известна, то секундный теплоприток от освещения

$$Q_4^1 = N_{СВ} \quad (4.17)$$

При проектировании охлаждаемых помещений можно пользоваться нормами мощности светильников, отнесенной к  $1 \text{ м}^2$  пола помещений. Так, для производственных помещений мощность светильников составляет  $7,5 \text{ Вт на } 1 \text{ м}^2$ , для складских помещений —  $3 \text{ Вт на } 1 \text{ м}^2$ . С учетом коэффициента одновременности включения светильников, численное значение которого зависит от размеров и назначения помещения и находится в пределах  $0,3 - 1,0$ , удельный теплоприток на  $1 \text{ м}^2$   $q_4^1$  будет:

для производственных помещений  $q_4^1 = 7,5 \times 0,6 = 4,5 \text{ Вт/м}^2$ ,

для крупных складских помещений  $q_4^1 = 3,0 \times 0,35 = 1,1 \text{ Вт/м}^2$ ;

для малых холодильных, камер  $q_4^1 = 3,0 \times 1 \text{ Вт/м}^2$ .

Теплоприток для всего помещения

$$Q_4^1 = q_4^1 \times F \quad (4.17a)$$

**Теплоприток от двигателей  $Q_4^{II}$ .** В охлаждаемом помещении (аппарате) могут работать какие-либо механизмы (машины), вентиляторы в системах воздушного охлаждения, мешалки, насосы и т. п. Работа электродвигателей этих механизмов и машин в конечном итоге превращается в теплоту, которая должна быть отведена из охлаждаемого помещения.

Если электродвигатель находится в охлаждаемом помещении, то и полезная его работа, и потери в самом двигателе, превращаясь в теплоту, передаются воздуху помещения. Поэтому теплоприток (Вт) от работающего оборудования мощностью  $N_{ДВ}$  (кВт)

$$Q_4^{II} = \eta_{одн} \times \sum N_{ДВ} \times 10^3 \quad (4.18)$$

где  $\eta_{одн}$  — коэффициент одновременности работы оборудования; в зависимости от числа имеющихся двигателей и от особенностей технологического процесса  $\eta_{одн} = 0,4 - 1,0$ .

В тех случаях, когда двигатели установлены вне охлаждаемого объекта, теплоприток создается в результате превращения в теплоту только полезной работы находящегося там оборудования (конвейеров, вентиляторов, мешалок и т. п.). Тогда

$$Q_4^{II} = \eta_{одн} \times \sum N_{ДВ} \times \eta_{дв} \times 10^3 \quad (4.18a)$$

где  $\eta_{дв}$  — коэффициент полезного действия двигателя.

**Теплоприток  $Q_4^{III}$  от людей, работающих в помещении.** Тепловыделение одним человеком с учетом влаговыделения при средней интенсивности работы составляет около  $350 \text{ Вт}$ . Если в помещении работает  $n$  человек, то общее тепловыделение составит

$$Q_4^{III} = 350 \times n \quad (4.19)$$

**Теплоприток из смежных помещений через открытые двери  $Q_4^{1111}$ .** При открывании дверей в смежные помещения с более высокой температурой в охлаждаемое помещение попадает воздух, приносящий с собой избыточную теплоту и влагу. Точный учет этого теплопритока затруднен, вследствие чего пользуются ориентировочными данными, для удобства расчета отнесенными к  $1 \text{ м}^2$  площади пола помещения

**Таблица 4.3** Значения удельных теплопритоков через двери (Вт/м<sup>2</sup>)

Назначение помещений	Площадь помещения F, м <sup>2</sup>		
	до 50	до 150	свыше 150
Камеры охлаждения мяса	14,0	7,0	6,0
Камеры хранения охлажденных продуктов	17,5	9,3	7,0
Камеры замораживания	18,5	9,5	7,0

Камеры хранения мороженных продуктов	13,0	7,0	4,5
Экспедиции	46,5	23,0	11,5

Численные значения этих удельных теплопритоков  $q_4^{1111}$  зависят от назначения помещения (с чем связаны интенсивность грузопотока через двери и перепад температур воздуха) и от размера помещения. Относительное значение теплопритоков через двери в малое помещение больше, чем в крупное. В табл. 4.3 даны значения удельных теплопритоков  $q_4^{1111}$  (Вт/м<sup>2</sup>) через двери в некоторые помещения с высотой 3,6 м; при большей высоте помещений численные значения теплопритоков пропорционально увеличиваются. Теплоприток для всего помещения

$$Q_4^{1111} = q_4^{1111} \times F \quad (4.20)$$

**Суммирование эксплуатационных теплопритоков.** При отнесении эксплуатационных теплопритоков на компрессор приходится считаться с тем, что на предприятии эти теплопритоки не могут возникать одновременно во всех помещениях и от всех источников. Поэтому нагрузку на компрессор принимают от 50 до 75% суммы всех эксплуатационных теплопритоков, т. е.

$$Q_{4к} = (0,50 \div 0,75) \times (Q_4^1 + Q_4^{11} + Q_4^{111} + Q_4^{1111}) \quad (4.21)$$

В нагрузку на камерное (местное) оборудование следует включать эксплуатационные теплопритоки полностью, поскольку в любом отдельном помещении вполне вероятно одновременное появление теплопритоков от всех этих источников, т. е.

$$Q_{4об} = Q_4^1 + Q_4^{11} + Q_4^{111} + Q_4^{1111} \quad (4.22)$$

Если при проектировании трудно учесть эксплуатационные теплопритоки по их источникам, то ориентировочно можно принимать  $Q_{4об} = (0,1 \div 0,4) \times (Q_1 + Q_3)$ . Относительно большую величину эксплуатационных теплопритоков следует принимать для малых установок.

## § 4.6.

### ИТОГОВЫЕ ДАННЫЕ РАСЧЕТА ТЕПЛОПРИТОКОВ

Все данные по нагрузке на камерное (местное) оборудование от отдельных источников теплопритока суммируют для каждого отдельного помещения или аппарата

$$Q_{об} = \sum Q_{обi} \quad (4.23)$$

Эта величина является расчетной нагрузкой для определения площади теплопередающей поверхности охлаждающих приборов, которые следует установить в данном охлаждаемом помещении (аппарате).

Несколько иначе обстоит дело с нагрузкой на компрессор. Этот вид нагрузки суммируется по группам помещений или технологических аппаратов, имеющих одинаковую или близкую, обычно от  $\pm 2$  до  $\pm 3$  К температуру. Так, на пищевых предприятиях, например, все потребители холода можно разбить на следующие группы: производственные помещения с температурой от  $+10$  до  $+12^\circ$  С; помещения или аппараты для охлаждения продуктов, помещения для хранения охлажденных продуктов с температурами от  $-2$  до  $+4^\circ$  С; помещения для хранения мороженных продуктов, аппараты для производства льда с температурой от  $-18$  до  $-20^\circ$  С; помещения для замороженных продуктов с температурой от  $-25$  до  $-30^\circ$  С; помещения и аппараты для замораживания продуктов при более низких температурах, примерно до  $-50^\circ$  С. Конечно, не на каждом предприятии имеется вся гамма уровней температуры, но три-четыре уровня температур (изотермы) используются часто.

Еще более широкая градация уровней температуры нужна для некоторых предприятий химической промышленности. Для отвода теплоты реакций, для создания условий, при которых наиболее эффективно протекают реакции, применяются примерно такие уровни температур: получение холодной воды с температурой от  $+5$  до  $+12^\circ$  С, а иногда и ледяной воды с температурой от  $+1$  до  $+3^\circ$  С; получение хладоносителя с температурой от  $-18$  до  $-25^\circ$  С; охлаждение хладоносителя или непосредственное охлаждение до температуры от  $-40$  до  $-50^\circ$  С;

получение низких температур в технологических аппаратах в интервале от  $-60$  до  $-70^\circ\text{C}$ ; совершение технологических процессов при температуре от  $-90$  до  $-100^\circ\text{C}$ .

Для каждой группы помещений выбирается температура кипения, определяющая условия работы холодильной машины. Естественно, что температура кипения  $t_0$  должна быть ниже необходимой температуры  $t_{\text{ПМ}}$  в охлаждаемом помещении или в технологическом аппарате. Выбор температуры кипения определяется численным значением наименьших приведенных затрат  $Z_{\text{пр}}$  [см. выражение (3.19)]. Чем меньше разность между температурой охлаждаемой среды и температурой кипения  $\Delta t = t_{\text{ПМ}} - t_0$ , тем выше сама температура кипения и тем меньше энергетические и другие затраты  $E$  на производство холода. Однако уменьшение разности температур  $\Delta t$  увеличивает площадь поверхности охлаждающих приборов  $F_0$ , так как

$$F_0 = Q_{06} / (k_0 \times (t_{\text{ПМ}} - t_0)) \quad (4.24)$$

В этом случае повышаются капитальные затраты  $K$ , на камерное оборудование и зависящие от них амортизационные отчисления  $A$ . Повышение разности температур  $\Delta t$ , требующее более низкой температуры кипения, приводит к противоположным результатам. Для охлаждаемых помещений, в которых хранятся неупакованные пищевые продукты, от разности температур между воздухом помещения и температурой поверхности охлаждающих приборов зависит усушка хранящихся продуктов. Повышение этой разности температур, вызванное понижением температуры кипения, увеличивает усушку продуктов и стоимость потерь  $U$ . При наличии такого рода противоположных тенденций в изменении расходов по отдельным статьям возможно отыскание оптимальной разности температур  $\Delta t_{\text{опт}}$ , которой соответствует наименьшее численное значение приведенных затрат. Общий вид графического решения этой задачи показан на рис. 4.8, где по оси ординат отложены приведенные затраты, отнесенные к 1 (кВт·ч) выработанного холода.

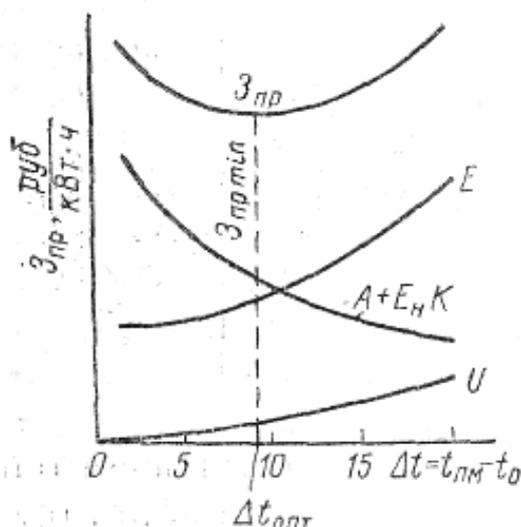


Рис. 4.8. Графическое определение оптимального перепада температур

Подобные расчеты, выполненные И. С. Бадылькесом (ВНИХИ), показали, что оптимальная разность температур  $t_{\text{ПМ}} - t_0$  в случае охлаждения воздуха лежит в пределах  $7 - 10\text{ K}$  для батарей и  $6 - 8\text{ K}$  для воздухоохлаждателей; в испарителях для охлаждения жидкостей эта разность температур  $4 - 6\text{ K}$ . Поэтому температура кипения для систем непосредственного охлаждения воздуха обычно равна  $t_0 = t_{\text{ПМ}} - (6 \div 10)$ ; а для охлаждения жидкостей  $t_0 = t_{\text{ПМ}} - (4 \div 6)$ ; в отдельных технологических аппаратах в целях ускорения процесса обработки она выбирается и значительно более низкой. При проектировании автоматизированных холодильников площадь поверхности охлаждающих приборов  $F_0$ , полученную по выражению (4.24), увеличивают на  $20\%$  (т. е. предусматривается работа охлаждающих приборов с коэффициентом рабочего времени  $b = 0,8$ ).

Объединение помещений и аппаратов по уровням температуры в них является, следовательно, их объединением по температурам кипения. Путем суммирования расчетных нагрузок на компрессор определяется холодильная мощность установки по каждой температуре кипения.

При выполнении приближенных расчетов теплопритоки: могут находиться по укрупненным показателям, отнесенным к 1 м<sup>2</sup> площади помещения или к единице выпускаемой продукции. В табл. 4.4 в качестве примера приведены некоторые из таких показателей, указывающих суммарный теплоприток в различные охлаждаемые помещения.

При использовании укрупненных показателей весь расчет теплопритоков заключается в умножении удельного теплопритока на площадь помещения, т. е.  $Q = q_F \times F$ . Разумеется, такой расчет неточен, но зато он позволяет дать быстрый ответ.

**Таблица 4.4** Укрупненные показатели суммарного удельного теплопритока

Назначение охлаждаемого помещения	Температура, °С	Удельный теплоприток $q_F$ , Вт/м <sup>2</sup>	
		Одноэтажный холодильник	Многоэтажный холодильник
Хранение мороженого мяса	-20	70 - 90	45 - 65
Хранение охлажденных продуктов	от - 3 до +4	80 - 95	60 - 65
Универсальные камеры	от - 20 до 0	75 - 125	70 - 80
Замораживание продуктов	- 30	850 - 900	850 - 900
Охлаждение мяса	- 10	450 - 500	450 - 500
Хранение охлажденного мяса	От - 2 до 0	80 - 100	50 - 60
Экспедиция	+12	35	35

