

Воздушный обогрев. Существует несколько способов воздушного обогрева: устройство открытого подполья; воздушный обогрев с принудительной циркуляцией воздуха; по каналам из труб; воздушный обогрев с естественной циркуляцией воздуха по каналам из труб; воздушный обогрев, совмещенный с охлаждением закрытых платформ.

В открытом вентилируемом подполье воздух движется под действием разности плотностей. В настоящее время этот способ защиты холодильного сооружения от пучения получил широкое распространение на крупных одноэтажных холодильниках в ГДР, Швеции и других странах. Устойчивость и надежность такой конструкции проверена многолетней практикой в различных странах. Она также не требует специального обслуживания, контроля и энергетических затрат на обогрев.

Воздушные каналы, выполненные из бетонных, цементных или керамических труб большого диаметра (0,250—0,38 см), укладывают между грунтом и изоляционной конструкцией пола с уклоном для стока конденсата. Для подачи воздуха в каналы применяют прямоточную реверсивную систему с двумя вентиляторами либо с одним (но снабженную устройством реверса). Такая система может работать и при естественной конвекции.

В теплый период года воздух, пройдя одну группу каналов, выходит наружу, в холодный циркулирует в системе. Для предотвращения неравномерности обогрева грунта и возможности льдовыделения в конце каналов предусмотрен перекидной шибер, позволяющий менять направление воздуха через определенные промежутки времени. Для нагрева воздуха используются паровые калориферы или электрокалориферы, или те и другие вместе.

В южной климатической зоне целесообразнее применять канальную систему с естественной конвекцией воздуха. Но в этом случае необходимо предохранять каналы от попадания атмосферной влаги и загрязнения.

Более экономичной такая система будет в случае использования холода, аккумулированного воздухом, для охлаждения закрытых платформ, а также для подачи его в воздушные конденсаторы, получившие в настоящее время большое распространение.

Обогрев жидкостью. В жидкостных системах используются жидкости с теплоемкостью, превышающей в несколько раз теплоемкость воздуха. Это позволяет уменьшить диаметр циркуляционных труб, а также перепад температур на входе и выходе из системы и, не применяя рециркуляции, обеспечить более равномерный обогрев грунта. Но для таких рабочих веществ необходимым условием является низкая температура замерзания порядка $-10 \div -20^\circ \text{C}$, такая, чтобы в случае длительной остановки системы не произошли разрушения циркуляционных труб. В качестве таких рабочих веществ применяют смазочные масла, а также этиленгликоль различных концентраций.

В данной системе стальные трубопроводы (предварительно защищенные от коррозии) заделывают в слой бетона толщиной не менее 0,1 м с уклоном для возможности стока жидкости самотеком. Их

группируют в секции подобно короткошланговым и длинношланговым батареям в холодильной технике по принципу равных гидравлических сопротивлений.

Методика теплового расчета данной системы сводится к следующему.

Тепловое сопротивление (в $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$) одной трубы

$$R = (1/2\pi\lambda) \ln [(2s/\pi d) sh(2\pi h/s)],$$

где λ — коэффициент теплопроводности бетона, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; h — глубина заложения труб, м; d и s — диаметр и расстояние между трубами, м.

Эквивалентная толщина слоя массива над плитой (в м)

$$h_{\text{экив}} = \lambda/R_{\text{к}},$$

где $R_{\text{к}}$ — коэффициент сопротивления теплопередачи изоляционной конструкции пола, учитывающий величину коэффициента теплопередачи у его поверхности.

Эффективная глубина замораживания нагревательных труб $h_{\text{эф}} = h + h_{\text{экив}}$.

Плотность теплового потока, поступающего в грунт $q_{\text{гр}}$, камеру $q_{\text{к}}$, а также общую плотность теплового потока от нагревательной плиты q_0 (в $\text{Вт}/\text{м}^2$) определяем по формулам

$$q_{\text{гр}} = (t_{\text{ср}} - t_{\text{гр}})/R_{\text{гр}},$$

$$q_{\text{к}} = (t_{\text{ср}} - t_{\text{к}})/R_{\text{к}},$$

$$q_0 = q_{\text{гр}} + q_{\text{к}},$$

где $R_{\text{гр}}$, $R_{\text{к}}$ — сопротивление теплопередаче в грунт и в камеру от нагревательной плиты, $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$;

$t_{\text{к}}$, $t_{\text{гр}}$, $t_{\text{ср}}$ — расчетные температуры воздуха в камерах и в грунте и средняя температура нагревательной плиты, $^{\circ}\text{C}$.

Потребные массовый G (в $\text{кг}/\text{с}$) и объемный V (в $\text{м}^3/\text{с}$) расходы жидкости, циркулирующей в системе (с учетом 30% потерь вне охлаждаемого контура),

$$G = 1,3q_0F/\Delta t_{\text{жкж}}; \quad V = G/\rho,$$

где F — площадь участка, м^2 ; $\Delta t_{\text{жкж}}$ — перепад температур жидкости; $\Delta t_{\text{жк}} = 4-5^{\circ}\text{C}$; $c_{\text{жк}}$ — удельная теплоемкость жидкости, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; ρ — плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Вследствие малых эксплуатационных затрат данная система обогрева грунта наиболее экономична. Ее применение целесообразно во всех климатических зонах, особенно в южной. Использование пластмассовых циркуляционных труб, других труб увеличивает надежность и долговечность системы.

Обогрев грунтов парами хладагента. Эта система разработана учеными Пражского научно-исследовательского института холодильного машиностроения и пищевой промышленности. Она состоит из стальных бесшовных труб, образующих конденсатор холодильной установки и уложенных в бетонную плиту на расстоянии в пределах 0,66—0,9 м с уклоном 0,7%. Парообразный хладагент, конденса-

руясь в трубах, отдает теплоту конденсации, нагревая грунт, а конденсат по тем же трубам стекает в испаритель.

Электрообогрев. Стальные стержни диаметром 6—12 см закладывают в бетонную плиту толщиной 100 мм на расстоянии 0,5—0,8 см друг от друга. После укладки стержни соединяют при помощи сварки последовательно в цепь. Они располагаются по всей площади камер. Из-за высокой стоимости электроэнергии, а также нецелесообразности затрат ее на отопление грунта этот метод применяют только в исключительных случаях.

Глава XIII

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ТЕПЛОВОДЫ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Тепловоды — теплообменные аппараты, основное назначение которых — перенос теплоты от источника к стоку.

По принципу действия тепловоды относятся к рекуперативным теплообменникам с промежуточным теплоносителем. Как и во всех теплообменниках такого типа, в системах с тепловодами несколько увеличена поверхность теплообмена и повышено значение полного термического сопротивления.

В отличие от теплообменников в тепловодах передача теплового потока осуществляется без дополнительных энергозатрат на циркуляцию промежуточного теплоносителя, что является их преимуществом. К преимуществам их относится также возможность придать конструкции необходимую форму в соответствии с характеристиками греющей (например, воздух) и охлаждающей (фреон) сред, что особенно существенно при большом различии их плотностей. Кроме того, такие конструкции обладают высокой надежностью, эффективностью теплопереноса, компактностью и практически неограниченными техническими ресурсом. Все это обуславливает широкие возможности применения тепловодов в самых различных областях техники. В настоящее время тепловоды, выполняя основное свое назначение, используются в криогенной и холодильной технике, в космических аппаратах, в ядерной энергетике, в электромашиностроении и т. д.

УСТРОЙСТВО ТЕПЛОВодов

Конструктивно тепловод может иметь произвольную форму. В большинстве известных технических решений применяется герметичная труба в виде прямого полого цилиндра. Рассмотрим два основных наиболее широко используемых типа тепловодов: тепловую трубу и термосифон.

Тепловая труба (рис. XIII.1, а) состоит из трубчатого корпуса длиной L и диаметром d , внутренняя полость которого выложена

капиллярно-пористой структурой, называемой фитилем. В качестве фитиля могут использоваться самая различная металлическая сетка, свернутая в несколько слоев, прессованная стружка, металлокерамика, резьба, нанесенная на внутреннюю поверхность трубы, и т. д. Капиллярно-пористый фитиль насыщен смачивающей жидкостью. Центральная часть трубы, предназначенная для течения пара, имеет

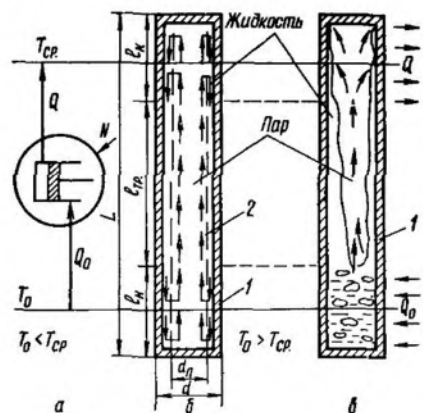


Рис. XIII.1. Принципиальные схемы передачи теплоты:

а — холодильной машиной; б — тепловой трубой (1 — корпус, 2 — фитиль); в — термосифоном (1 — корпус).

тепловую трубу, из которой вынули капиллярно-пористую структуру. Конденсат, образующийся на охлаждаемом участке, возвращается к участку обогрева под действием внешних сил: гравитационных, центробежных, электростатических и т. д. Наиболее широко распространены термосифоны, циркуляция теплоносителя в которых осуществляется под действием сил гравитации. Основным преимуществом термосифонов по сравнению с другими типами тепловодов является их технологичность в изготовлении. К недостаткам их относится то, что участок охлаждения должен быть всегда выше участка обогрева или находиться на одном уровне с ним. Кроме того, в земных условиях эффективность работы низкотемпературных тепловых труб существенно зависит от их ориентации в пространстве.

В зависимости от свойств промежуточного теплоносителя тепловоды условно подразделяют на криогенные, низкотемпературные и высокотемпературные.

Теплоносители, используемые в области криогенных температур (гелий, аргон, криптон, азот, кислород), обладают низкими значениями скрытой теплоты фазового перехода и поверхностного натяжения. В связи с этим криогенные тепловоды характеризуются низкой теплопередающей способностью.

Теплоносители, применяемые в области низких температур (фреоны, аммиак, спирты, эфиры, вода), обладают низкой теплопровод-

диаметр d_p . По всей длине тепловая труба (и термосифон) делится на три зоны: испарения $l_{\text{и}}$, транспортную (адиабатную) $l_{\text{тр}}$ и конденсации $l_{\text{к}}$. В ряде случаев транспортный участок может отсутствовать.

При нагревании одного конца тепловой трубы жидкость испаряется и образовавшийся пар поступает на охлаждаемый участок, где конденсируется; затем жидкость под действием капиллярного давления поступает по пористой структуре к участку обогрева.

Высокая эффективность тепловодов объясняется использованием в процессе переноса теплоты скрытой теплоты парообразования.

Термосифоны (рис. XIII.1, в) конструктивно представляют собой

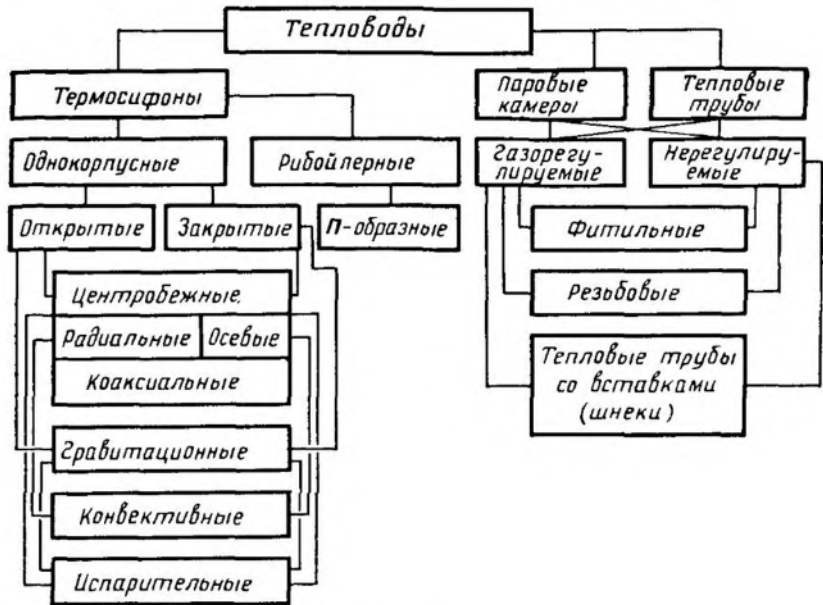


Рис. XIII.2. Классификация теплообменников

ностью, поэтому перенос теплоты осуществляется при значительных перепадах температур между участками испарения и охлаждения. Этот перепад, как правило, соизмерим с температурным уровнем работы теплообменника. В высокотемпературных теплообменниках используются сера, ртуть и щелочные металлы. При температурах выше 750 К применяют калий, натрий, свинец, серебро и т. д.

Классификация теплообменников приведена на рис. XIII.2.

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОБМЕННИКОВ

Широко распространены термосифоны в практике северного строительства с целью охлаждения или замораживания грунта естественным холодом, например при строительстве Байкало-Амурской магистрали, нефтегазопровода на Аляске и т. д. Термосифоны (их в этом случае называют термосваи) позволяют предохранять от протаивания вечномёрзлые грунты, обеспечивая прочность и водонепроницаемость оснований возводимых сооружений. Термосваи обладают рядом существенных преимуществ перед такими традиционными способами использования естественного холода, как устройство проветривания подполья или принудительная вентиляция атмосферного воздуха. Главными из них являются возможность эффективной транспортировки тепла со значительных глубин (до 20 м), отсутствие потребности в дополнительных энергозатратах и обслуживании, простота, технологичность и надежность конструкции.

Устойчивая работа термосвай возможна при условии, когда температура атмосферного воздуха T_a становится ниже температуры грунта T_r , при этом возникает циркуляция промежуточного теплоносителя, осуществляющего перенос теплоты. Перемещение массы вещества требует затрат механической энергии, которая получается в результате превращения в работу части теплоты, отбираемой от грунта. Наличие разности температур создает условия для осуществления прямого термодинамического цикла — работа l происходит в результате подвода теплоты q от грунта к теплоносителю и отвода теплоты q_0 в воздух. Полученная в прямом термодинамическом цикле работа расходуется на перемещение пара в поле действия сил гравитации и преодоление сил трения, превращаясь в теплоту. Поскольку не производится внешней механической работы, общее количество теплоты, подведенной к термосвае, равно количеству теплоты, отданной в воздух.

Теоретические расчеты и экспериментальные исследования, выполненные в Ленинградском технологическом институте холодильной промышленности, свидетельствуют о том, что эффективность внутреннего осевого теплопереноса испарительных (или «паровых») термосвай в 5—10 раз выше, чем жидкостных (конвективных) и тем более газовых (продухов). При небольших глубинах замораживания в районах с очень низкими зимними температурами может оказаться рациональным применение жидкостных или газовых термосвай.

В бытовых холодильниках используют термосифоны для охлаждения герметичных фреоновых компрессоров и для компоновки двухкамерной схемы холодильника.

Термосифоны широко применяют для интенсификации охлаждения электрических двигателей. Некоторые предприятия и фирмы в Чехословакии, Японии и ФРГ начали выпускать электродвигатели с термосифонами, расположенными в валу ротора. Тепловой поток от ротора нагревает промежуточный теплоноситель, который испаряется, и пар перемещается к концам вала, где установлены охлаждающие машину вентиляторы. На концах вала пар конденсируется, и пленка жидкости под действием центробежных сил возвращается в зону нагрева.

Интенсификация охлаждения электродвигателей возможна и при использовании схемы с гравитационными термосифонами, разработанной в Одесском технологическом институте холодильной промышленности (ОТИХП) совместно с ВНИПТИЭМ (г. Владимир). В этом случае термосифоны предназначены для передачи теплового потока от внутреннего воздуха к наружному, который нагнетается вентилятором наружного обдува. Испытания двигателя, изготовленного на базе серийного асинхронного двигателя 4АН315М6, показали, что при полной унификации основных узлов машины (ротор, статор, подшипниковые щиты и т. д.) мощность электродвигателя возросла со 132 до 160 кВт, а масса его при этом снизилась более чем на 100 кг (литая чугунная станина была заменена корпусом из стального листа). Испытания еще восьми электродвигателей с другими высотами оси вращения единой серии 4А подтвердили перспективность приме-

нения термосифонов для интенсификации охлаждения электродвигателей.

В холодильных установках термосифоны используют при создании воздухоохладителей.

Воздухоохладитель, разработанный во Всесоюзном научно-исследовательском институте холодильной промышленности, предназначен для предотвращения гидравлического удара. Кроме того, применение такого воздухоохладителя позволяет устранить явление неравномерного распределения хладагента в трубах из-за особенностей гидродинамики в коллекторах воздухоохладителей обычных конструкций.

Наиболее широко используются тепловоды при проектировании теплообменного оборудования. По назначению теплообменники такого типа можно условно разделить на две группы: теплообменники специального назначения; теплообменники для утилизации теплоты и холода («процесс — процесс», «процесс — комфорт», «комфорт — комфорт»).

К теплообменникам специального назначения относятся прежде всего аппараты, используемые в холодильных установках, работающих в условиях агрессивных сред, например в химической технологии.

Теплообменники класса «процесс — процесс» получили широкое распространение за рубежом в пищевой промышленности. Они обеспечивают 65%-ную регенерацию теплоты поступающего воздуха за счет утилизации энергии и окупаются за 2 года. Типичным представителем теплообменников типа «процесс — комфорт» является аппарат, разработанный в ОТИХПе для утилизации теплоты отработавшего пара вспомогательной турбины для подогрева воздуха в системах зимнего судового кондиционирования. Теплообменники «комфорт — комфорт» изготавливают японские фирмы. В нашей стране ЦНИИпромзданий разработал аналогичную конструкцию для утилизации теплоты и холода при кондиционировании воздуха в жилых помещениях. Для систем судового кондиционирования теплообменники такого класса были разработаны в ОТИХПе.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ С НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫМИ ТЕПЛОВОДАМИ

При проектировании систем с низкотемпературными тепловодами необходимо проводить оптимизацию системы с учетом внешнего теплообмена. Рассмотрим задачу оптимизации на примере воздухоохладителя, предназначенного для утилизации холода.

Тепловоды в воздухоохладителе являются автономными теплопередающими элементами, поэтому эквивалентную схему термических сопротивлений такого теплообмена можно представить по аналогии с совокупностью параллельных сопротивлений

$$R_k = \left[\sum_{i=1}^N 1/R_x \right]^{-1}, \quad (\text{XIII.1})$$

где R_x — полное термическое сопротивление представительной ячейки теплообменника, включающей в себя один тепловод, часть трубной доски и окружающие объемы внешних сред (рис. XIII.3).

Соотношение между составляющими термическими сопротивлениями такой ячейки определяется уравнением вида

$$R_x = [(R_1 + R_{и1}) + (R_K + R_2)] \left(1 + \frac{R_K + R_2}{\sum_j R_j} \right)^{-1} \left\{ 1 + (R_1 + R_{и1}) + \frac{R_K + R_2}{1 + (R_K + R_2) \left(\sum_j R_j \right)^{-1} \left(\sum_i R_i \right)^{-1}} \right\}^{-1}. \quad (\text{XIII.2})$$

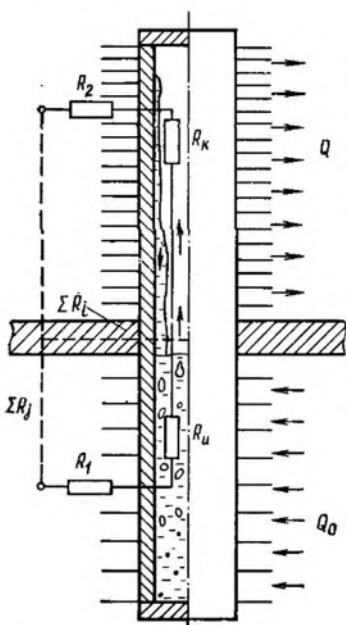
С достаточной для инженерных расчетов точностью в ряде задач можно принять, что термические сопротивления теплопередачи от транспортного участка $\sum_j R_j$ и непосредственно через трубную доску $\sum_i R_i$ значительно больше, чем сопротивление внутри тепловода при фазовых превращениях промежуточного теплоносителя ($R_{и1} = 1/\bar{\alpha}_{и1} F_{и1}$; $R_K = 1/\bar{\alpha}_K F_K$) и процессов внешнего теплообмена ($R_1 = 1/\bar{\alpha}_1 F_1$; $R_2 = 1/\bar{\alpha}_2 F_2$).

Тогда из уравнения (XIII.2) получается простое уравнение

$$R_x = R_1 + (R_{и1} + R_K) + R_2,$$

или

$$R_x = \left(\frac{1}{\bar{\alpha}_1 \xi_1} + \frac{1}{\bar{\alpha}_{и1}} \right) \frac{1}{\pi d l_{и1}} + \left(\frac{1}{\bar{\alpha}_2 \xi_2} + \frac{1}{\bar{\alpha}_K} \right) \frac{1}{\pi d l_K}, \quad (\text{XIII.3})$$



здесь $\xi_{1(2)}$ — коэффициенты внешнего оребрения; $\bar{\alpha}_{1(2)}$ — коэффициент теплоотдачи внешнего теплообмена, Вт/(м²·К); $\bar{\alpha}_{и1}$, $\bar{\alpha}_K$ — средние значения коэффициентов теплоотдачи при испарении и конденсации в тепловодах, Вт/(м²·К); $l_{и1}$, l_K — длина участков обогрева и охлаждения тепловода соответственно, м.

Примем в качестве критерия оптимальности условие минимума значения полного термического сопротивления R_x . Уравнение (XIII.3) существенно упрощает задачу оптимизации, поскольку решение сводится к отысканию оптимума функции вида $R_{x \text{ опт}} = f(l_{и1}; l_K)$.

В качестве условия связи величин $l_{и1}$ и l_K принимается постоянство полной длины тепловода, которая определена конструктивными особенностями системы: $L = l_{и1} + l_{тД} + l_K$.

Рис. XIII.3. Эквивалентная схема замещений представительной ячейки теплообменника с тепловодами.

Полагая, что компоновка теплопроводов в теплообменнике не оказывает существенного влияния на режим течения внешних сред, для осредненных характеристик теплообмена в межтрубном пространстве получаем

$$\frac{\partial R_x}{\partial l_{II}} = \left(\frac{1}{\bar{\alpha}_2 \xi_2} + \frac{1}{\bar{\alpha}_K} \right) \frac{1}{\pi d (L - l_{TP} - l_{II})^2} - \left(\frac{1}{\bar{\alpha}_1 \xi_1} + \frac{1}{\bar{\alpha}_{II}} \right) \frac{1}{\pi d l_{II}^2}. \quad (\text{XIII.4})$$

Приравняв уравнение (XIII.4) нулю, получим корни уравнения

$$\frac{l_{II}}{l_K} = \sqrt{\frac{\bar{\alpha}_{II}}{\bar{\alpha}_K} \left(1 + \frac{\bar{\alpha}_K}{\bar{\alpha}_2 \xi_2} \right) / \left(1 + \frac{\bar{\alpha}_{II}}{\bar{\alpha}_1 \xi_1} \right)} \quad (\text{XIII.5})$$

Подставляя выражение (XIII.5) в уравнение (XIII.4), получим окончательное выражение для оптимального значения полного термического сопротивления представительной ячейки

$$R_{x \text{ опт}} = \frac{1}{\pi d l_K \bar{\alpha}_K} \left[\frac{\bar{\alpha}_K}{\bar{\alpha}_{II}} \left(1 + \frac{\bar{\alpha}_K}{\bar{\alpha}_1 \xi_1} \right) \sqrt{\frac{\bar{\alpha}_{II}}{\bar{\alpha}_K} \left(1 + \frac{\bar{\alpha}_K}{\bar{\alpha}_2 \xi_2} \right) / \left(1 + \frac{\bar{\alpha}_{II}}{\bar{\alpha}_1 \xi_1} \right)} + \left(1 + \frac{\bar{\alpha}_K}{\bar{\alpha}_2 \xi_2} \right) \right]. \quad (\text{XIII.6})$$

При проектировании систем с тепловодами значения $\bar{\alpha}_1$ и $\bar{\alpha}_2$ определяют по известным зависимостям для конвективного теплообмена при обтекании оребренных (или гладких при $\xi_{1(2)} = 1$) трубных пучков.

Если в системе используют тепловоды типа тепловые трубы, фитиль которых изготовлен из свернутой в несколько слоев металлической сетки, то интенсивность теплообмена внутри тепловой трубы на участке испарения рассчитывают по формуле

$$\frac{1}{\bar{\alpha}_{II}} = \frac{\delta - a}{\lambda_{\text{эф}}} + \left(R_0 + \frac{a}{\lambda_{\text{эф}}} \right) \exp \left\{ -1,16 \frac{Q}{Q_{\text{max}}} \left(1 + \sqrt{\frac{\lambda'}{\lambda_c}} \right) \right\} \quad (\text{XIII.7})$$

Здесь δ — толщина фитиля; a — размер ячейки сетки; Q — переносимая тепловая мощность; λ' — теплопроводность жидкой фазы теплоносителя; Q_{max} — предельная переносимая мощность.

Интенсивность теплообмена на участках подвода теплоты обусловлена особенностями теплопередачи через насыщенный фитиль, эффективную теплопроводность которого рассчитывают по формуле

$$\lambda_{\text{эф}} = \lambda_c + \left[1 - \frac{1}{(1+c)^2} \right] \lambda'. \quad (\text{XIII.8})$$

Теплопроводность структуры λ_c с учетом проводимости в местах контакта слоев сетки

$$\lambda_c = (1,85m^{0,5} \lambda_m + 8,95 \lambda') / (1+c)^2, \quad (\text{XIII.9})$$

где λ_m — теплопроводность материала сетки.

В случае высокой эффективной теплопроводности фитиля или малой его толщины экспериментально обнаружено увеличение коэффициента теплоотдачи с ростом теплового потока. Это объясняется влиянием появляющегося в этих условиях дополнительного термического сопротивления при формировании зеркала испарения в форме мениска на поверхности фитиля

$$R_0 = 0,32a / \left[\lambda' \varepsilon_\lambda \frac{\varepsilon_\lambda}{1 - \varepsilon_\lambda} \sqrt{\frac{\lambda'}{\lambda_c}} \left(1 + \sqrt{\frac{\lambda'}{\lambda_c}} \right) \right]. \quad (\text{XIII.10})$$

На участке конденсации, где радиус мениска бесконечно велик, так как поверхность жидкости практически плоская, $R_0 = 0$. С учетом автомодалности R_0 относительно передаваемой мощности (приняв $Q = 0$) из уравнения (XIII.7) получаем

$$\frac{1}{\bar{\alpha}_K} = \frac{\delta - a}{\lambda_{эф}}$$

В практике инженерных расчетов чаще используют

$$\bar{\alpha}_K \approx \lambda_{эф} / \delta. \quad (\text{XIII.11})$$

Предельную тепловую нагрузку для случая гидродинамического запаривания фитиля рассчитывают по формуле

$$\begin{aligned} & \frac{\sigma \cos \theta}{l_K - \frac{Q_{\max} \ln(1-x)}{4\pi\lambda_{эф}} \sum \frac{1}{\Delta t_i} c d_{np}} + \frac{1}{4} \rho' g \sin \varphi = \\ & = \frac{Q_{\max}}{2\pi d_n^2} \left[\frac{32\nu''}{d_n^2 (1-x)^4} + \frac{\nu'}{\pi d_{np}^2 [1 - (1-x)^2]} \right], \end{aligned} \quad (\text{XIII.12})$$

где

$$\sum \frac{1}{\Delta t_i} = \frac{1}{(\bar{t}_K - t'')} + \frac{1}{(t'' - \bar{t}_K)}; \quad x = \frac{2\delta}{d_n};$$

$$c = \frac{a}{d_{np}} = 1,4 \div 2,5; \quad m = \varepsilon_\lambda = 0,0025 \div 0,06.$$

Здесь σ — поверхностное натяжение жидкости; θ — угол смачиваемости; φ — угол наклона тепловой трубы к горизонту; ρ' — плотность жидкой фазы теплоносителя; ν' — вязкость жидкой фазы теплоносителя; ν'' — вязкость паровой фазы теплоносителя; d_{np} — диаметр проволоки сетки.

Если в системе применяют термосифоны, то интенсивность теплообмена при кипении промежуточного теплоносителя (при граничных условиях, близких к $t = \text{const}$) рассчитывают по следующим зависимостям.

Для области пузырькового кипения ($Re_\Delta \leq R_{\Delta np}$)

$$\bar{Nu}_\Delta = 0,25 \cdot 10^{-6} Re_\Delta^{2/3} \Pi^{-0,8} \left(\frac{\rho''}{\rho'} \right)^{0,21} \Omega^{0,24} \left(d \sqrt{\frac{g(\rho' - \rho'')}{\sigma}} \right)^{1,2}; \quad (\text{XIII.13})$$

для области устойчивого кипения с частичным образованием паровых пленок ($Re_{\Lambda} \geq Re_{\Lambda \text{ гр}}$)

$$\overline{Nu}_{\Lambda} = 3,43 Re_{\Lambda}^{0,08} \left(\frac{\rho''}{\rho'} \right)^{0,21} \left(d \sqrt{\frac{g(\rho' - \rho'')}{\sigma}} \right)^{0,81} \quad (\text{XIII.14})$$

Условие существования этих режимов определяется значением граничного числа

$$Re_{\Lambda \text{ гр}} = 0,87 \Omega^{0,64} \left(d \sqrt{\frac{g(\rho' - \rho'')}{\sigma}} \right)^{2,06} \quad (\text{XIII.15})$$

Область применения зависимостей (XIII.13) ÷ (XIII.15) ограничивается условиями

$$d = 10 \div 22 \text{ мм}; \quad 30 \leq Re_{\Lambda} \leq 10^6; \quad 10^{-7} \leq \Pi \leq 10^{-6}; \quad 8 \cdot 10^{-4} \leq \rho''/\rho' \leq 2 \cdot 10^{-1};$$

$$3\% \leq \Omega \leq 60\%; \quad 6 \leq d \sqrt{\frac{g(\rho' - \rho'')}{\sigma}} \leq 13.$$

Здесь

$$\overline{Nu}_{\Lambda} \equiv \frac{\bar{\alpha}_{\text{н}}}{\lambda'} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho' - \rho'')}}; \quad Re_{\Lambda} \equiv \frac{W''}{\nu'} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho' - \rho'')}};$$

$$\Pi \equiv \frac{\rho'' g}{P} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho' - \rho'')}}; \quad W'' \equiv \frac{4Q}{\pi d_{\text{н}}^2 \rho'' r}; \quad \Omega = \frac{V'}{V_{\Sigma}} 100\%,$$

где r — скрытая теплота парообразования; P — давление в термосифоне; V' — объем жидкой фазы теплоносителя; V_{Σ} — объем термосифона.

Интенсивность теплообмена при конденсации в термосифонах при отсутствии неконденсирующихся примесей с достаточной точностью можно рассчитать по известному уравнению Нуссельта для пленочной конденсации на плоской стенке.

Уравнение (XIII.6) совместно с выражениями (XIII.7) — (XIII.12) и (XIII.13) — (XIII.15) позволяет проектировать теплообменники с низкотемпературными тепловыми трубами и термосифонами.

Глава XIV

ПРИМЕНЕНИЕ ХОЛОДИЛЬНЫХ УСТАНОВОК В РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЯХ НАРОДНОГО ХОЗЯЙСТВА

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В различных отраслях народного хозяйства, например в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности, холодильные установки применяют для охлаждения как промежуточных хладоносителей, так и непосредственно технологических продуктов. В тех случаях, когда в охлаждаемых объектах необходимо поддерживать температуру не ниже -35°C , обычно применяют промежуточные хладоносители.

Для получения температур $-50 \div -60^{\circ}\text{C}$ используют установки с непосредственным охлаждением, а более низких температур (-110°C) — специальные каскадные холодильные комплексы [15].

Зимний режим

Летний режим

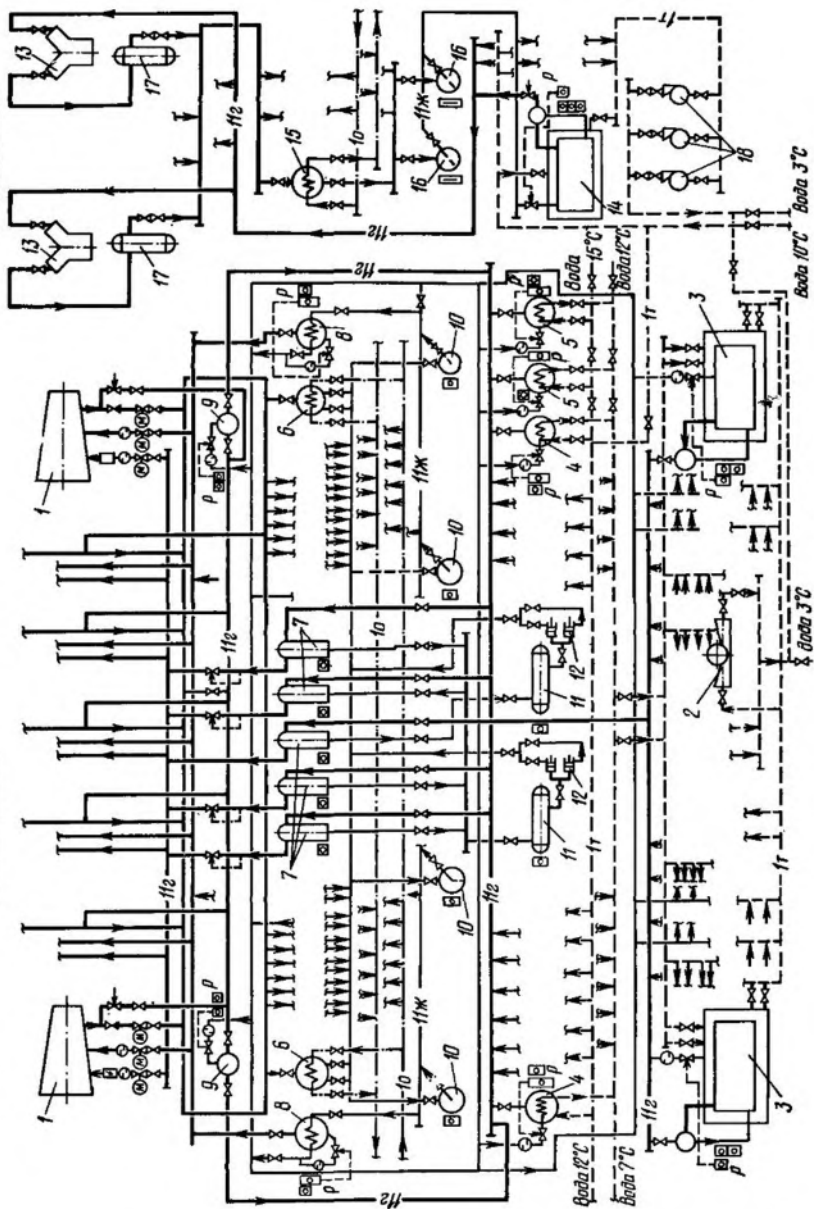


Рис. XIV.1. Холодильная станция производительностью 3600 кВт:

1 — агрегат с центробежным компрессором АТКА-635-4000; 2 — центробежный насос 12НДС; 3 — панельный испаритель 320 ИПМ; 4 — кожухотрубный испаритель ИТГ-800; 5 — кожухотрубный испаритель ИТГ-630; 6 — кожухотрубный горизонтальный конденсатор КТГ-630; 7 — отделитель жидкости ОЖ-400; 8 — промежуточный сосуд ПСГ-90; 9 — сосуд для охлаждения байпасного пара СОБП-350; 10 — резервная емкость 32РЕ; 11 — дренажный ресивер БРД; 12 — плунжерный насос РАНК 2-30; 13 — поршневой компрессор АУ 300/2; 14 — панельный испаритель 240 ИПМ; 15 — кожухотрубный конденсатор КТГ-180; 16 — ресивер 2,5 РИ; 17 — маслоотделитель 100 ОММ; 18 — центробежный насос 4К-8.

Холодильные установки, применяемые в этих отраслях промышленности, должны обеспечивать большую производительность — десятки тысяч кВт; широкий диапазон режимных параметров хладагентов и хладоносителей; высокую надежность в связи с необходимостью непрерывного и длительного осуществления технологического процесса; автоматическое поддержание заданных параметров, включая регулирование производительности; использование энергетических ресурсов производства, включая низкопотенциальные источники энергии.

Этим требованиям наиболее полно отвечают крупные агрегаты с поршневыми, а также с винтовыми и центробежными компрессорами производительностью свыше 5 тыс. кВт.

Как правило, на предприятиях рассматриваемой отрасли промышленности имеются значительные запасы «бросовой» низкопотенциальной энергии (горячая вода, пар низкого давления, отходы горячих смесей технологических продуктов), что позволяет применять абсорбционные и парожektorные холодильные машины. Технико-экономический анализ показывает, что в этих условиях затраты на создание парожektorных в 1,5 раз, а абсорбционных бромистолитиевых установок в 2 раза ниже по сравнению с затратами на создание фреоновых холодильных установок с центробежными компрессорами.

При наличии отработавших горячих газов применяют в качестве приводов компрессоров холодильных агрегатов двигатели внутреннего сгорания и газовые турбины.

Целесообразность выбора рабочего вещества определяется его термодинамическими свойствами, а также экономическими и эксплуатационными показателями установки в целом. При выборе учитывают возможность использования технологических продуктов в качестве хладагентов. Наиболее распространены такие рабочие вещества, как аммиак, R12, R22, пропан, пропилен, этан, этилен и др. В качестве промежуточных хладоносителей используют воду, водные растворы хлористого натрия, хлористого кальция, кальциевой селитры, этиленгликоль, R30, R11. Около 20% искусственного холода в химической промышленности затрачивается на охлаждение воды.

Производительность и тип применяемого оборудования определяются мощностью холодильной установки в целом. Так, для холодильной установки мощностью до 2000 кВт используют поршневые, ротационные и винтовые компрессоры холодопроизводительностью 300—500 кВт; до 6000 кВт — поршневые компрессоры производительностью до 1500 кВт; свыше 6000 кВт — центробежные. Конденсаторы обычно охлаждаются водой от общезаводской системы оборотного водоснабжения, что в большинстве приводит к значительному повышению давления конденсации и заставляет применять установки двухступенчатого сжатия даже при относительно высоких температурах кипения (например, — 20° С).

Теплообменное оборудование холодильных станций (конденсаторы, испарители), так же, как и абсорбционные холодильные машины, монтируют на открытых площадках. Компрессорное и насосное оборудование станции устанавливают в одноэтажных зданиях с глубокими каналами для прокладки трубопроводов или в двухэтажных зданиях, на первом этаже которых располагают вспомогательную аппаратуру, насосы и трубопроводы.

Схема холодильной станции производительностью 3800 кВт, предназначенная для охлаждения воды, показана на рис. XIV.1.

ПРОИЗВОДСТВО АММИАКА

Производство аммиака включает в себя три технологические стадии: получение газовой азотоводородной смеси, очистку смеси от примесей и синтез аммиака.

Азотоводородную смесь получают одним из следующих способов: конверсия метана из природного газа; конверсия метана из продуктов нефтепереработки; разделение коксового газа; газификация жидкого и твердого топлива; электролиз воды. Способ получения азотоводородной смеси зависит от вида исходного сырья и места расположения установки.

В настоящее время наиболее широко в качестве исходного сырья используют природный газ. Установки для синтеза аммиака условно разделяют на три группы: низкого $[(9,8-19,6) \cdot 10^6 \text{ Па}]$, среднего $[(24,5-34,2) \cdot 10^6 \text{ Па}]$ и высокого $[(49-98) \cdot 10^6 \text{ Па}]$ давлений.

В мировом производстве аммиака количество установок синтеза при среднем давлении составляет 70%, а при низком и высоком соответственно 5 и 25%. В установках синтеза аммиака при высоком давлении искусственный холод вообще не применяют, а в установках среднего и низкого давления затраты энергии на производство холода составляют соответственно 9,1 и 16,2% от общих энергозатрат. Расход энергии в установках, работающих по схеме среднего давления, приведен в табл. XIV.1.

Таблица XIV.1

Статьи энергозатрат	Расход энергии (в кВт·ч на 1 т) при давлении сжимаемых газов 10^6 Па		
	19,6	29,5	98
Сжатие азотоводородной смеси	748	804	976
Охлаждение азотоводородной смеси	160	85	—
Работа вспомогательного оборудования и электроподогрев	85	50	34
Всего	993	939	1010

Охлаждение азотоводородной смеси позволяет увеличить производительность установок. Так, для систем, работающих при среднем давлении, с понижением температуры азотоводородной смеси от 10 до 0°С выработка аммиака из данной смеси увеличивается на 37,5%.

На аммиачных заводах холодильные установки применяют для получения азотоводородной смеси при разделении газа и для тонкой очистки газа от окиси углерода и метана; для охлаждения азотоводородной смеси в технологическом цикле; для получения аммиака из азотоводородной смеси путем температурного разделения; для хранения производственного жидкого аммиака при низких температурах (—33°С).

Для охлаждения коксового газа (либо воздуха) перед поступлением в блок разделения до температуры —40 —43°С применяют аммиачные холодильники, которые представляют собой вертикальные кожухотрубные аппараты высотой более 7 м.

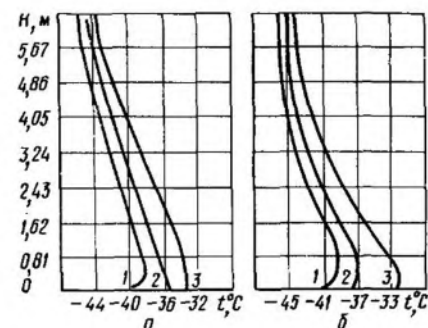


Рис. XIV.2. График распределения температур в аммиачном теплообменнике воздуха низкого давления при высоте заполнения 6,5 м (а) и 4,2 м (б):

1, 2, 3 — соответственно температуры аммиака, наружной поверхности трубки, воздуха.

Для компенсации теплового расширения в верхней части аппарата предусмотрена подвижная трубная решетка. В межтрубное пространство поступает коксовый газ либо воздух, в трубах кипит аммиак при температуре —45÷ —53°С. Для обеспечения непрерывности технологического процесса теплообменники монтируют попарно.

Как правило, применяют безнасосную систему охлаждения с отделителем жидкости. Однако в такой системе, как показано О. В. Парижским, из-за влияния столба жидкого хладагента тепловая эффективность аппаратов снижается в среднем на 50% (рис. XIV.2). Насосно-циркуляционные схемы охлаждения с нижней и верхней подачи жидкого хладагента в теплообменники лишены этого недостатка, и, кроме того, позволяют обеспечить равномерное рас-

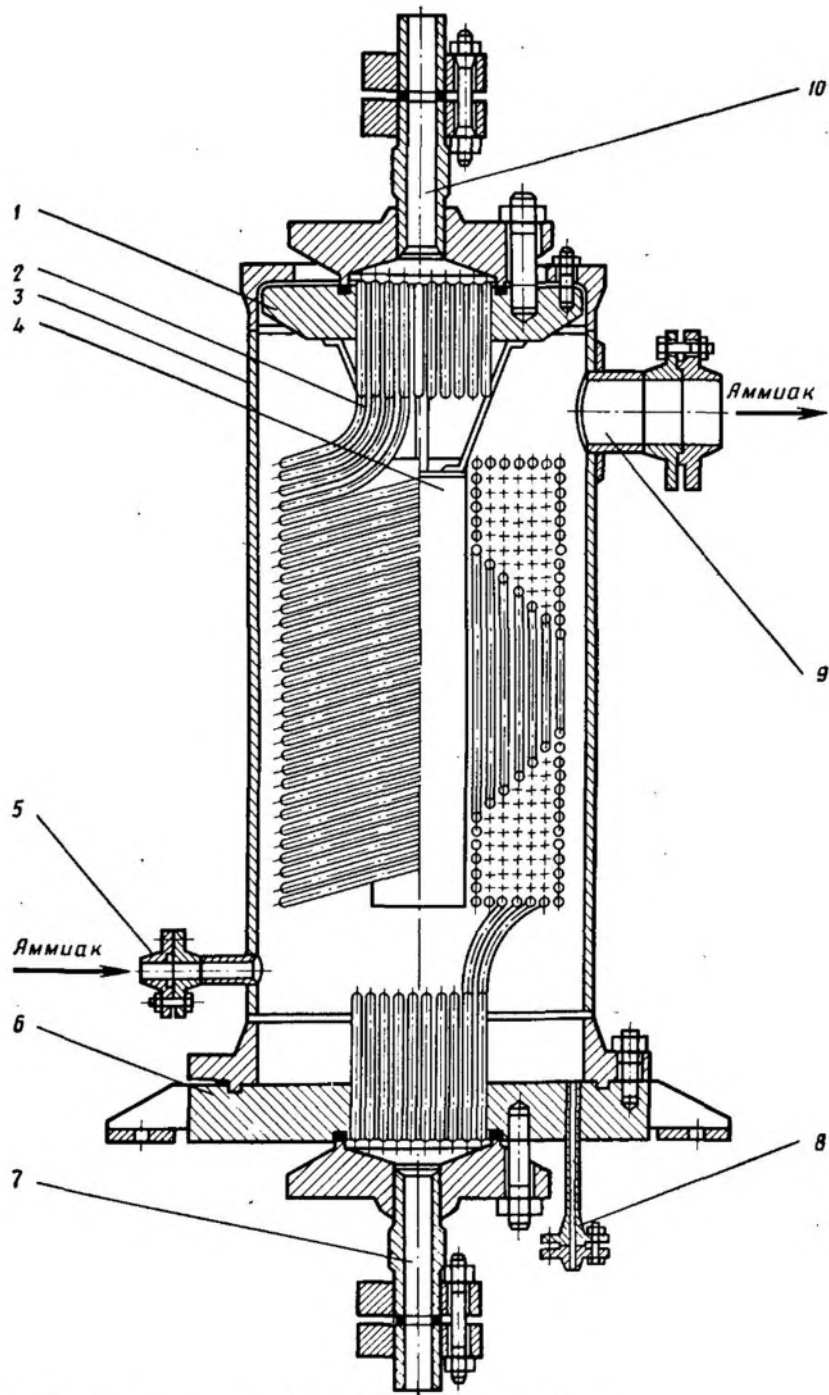


Рис. XIV.3. Аммиачный холодильник высокого давления

1 — верхняя трубная решетка; 2 — змеевик; 3 — обечайка холодильника; 4 — заполнитель; 5 — штуцер подвода жидкого аммиака; 6 — нижняя трубная решетка; 7 — штуцер подвода азота; 8 — штуцер слива аммиака; 9 — штуцер отвода паров аммиака; 10 — штуцер отвода охлажденной воды

пределение жидкого хладагента по теплообменным аппаратам и сократить энергетические затраты на производство холода.

В блоках разделения используют также аммиачный холодильник (рис. XIV.3) для охлаждения азота с давлением $19,6 \cdot 10^6$ Па до температуры $-40 \div -45^\circ \text{C}$.

Трубы змеевика 2 закреплены в решетках 1 и 6. Змеевик восьмирядный с переменным числом заходов труб в каждом ряду (в первом ряду 6, в восьмом 16), что позволяет выполнить ветви змеевика равной длины и с одинаковым со-

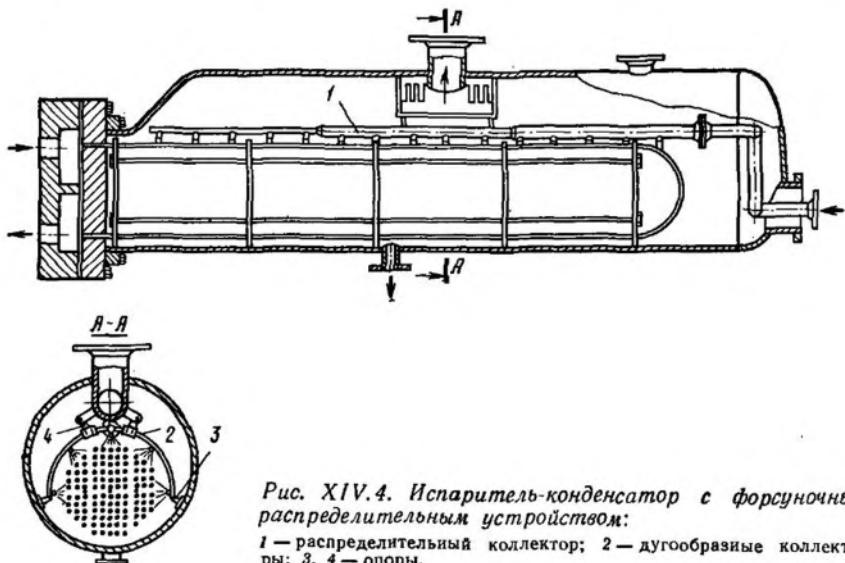


Рис. XIV.4. Испаритель-конденсатор с форсуночным распределительным устройством:

1 — распределительный коллектор; 2 — дугообразные коллекторы; 3, 4 — опоры.

противлением. Внутри аппарата установлен наполнитель 4, который служит также основанием для укладки труб змеевика. Азот проходит по змеевику снизу вверх, в межтрубном пространстве кипит аммиак. Так же, как и аммиачные холодильники коксового газа и воздуха низкого давления, холодильники азота высокого давления включают в схему попарно, что обеспечивает непрерывность работы блока разделения. Аппараты оттаивают горячими парами аммиака. Аммиачную установку обслуживают компрессорные агрегаты двухступенчатого сжатия. Расход холода при разделении коксового газа с учетом промывки его жидким азотом составляет около 29 кДж на 1 м^3 газа.

Для охлаждения и конденсации азотоводородной смеси применяют одноступенчатые аммиачные установки. Основным элементом охлаждающей системы такой установки является конденсатор-испаритель с U-образными трубками. Теплота конденсации азотоводородной смеси отводится аммиаком, кипящим в межтрубном пространстве при -10°C .

Система охлаждения насосно-циркуляционная, что позволяет эксплуатировать установку при трех способах распределения жидкого аммиака по теплообменной поверхности испарителя-конденсатора. При эксплуатации по первому способу жидкий хладагент подается насосом в верхнюю часть межтрубного пространства аппарата, а неиспарившаяся часть его вместе с парами, маслом и загрязнениями поступает в циркуляционный ресивер. Благодаря вынужденному движению жидкого аммиака термическое сопротивление у поверхности труб аппарата уменьшается в 2—2,5 раза, а коэффициент теплопередачи аппарата достигает 2000—2500 Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{K}$). При работе по второму способу наружная поверхность труб орошается кипящим аммиаком с помощью струйно-вихревых форсунок (рис. XIV.4). Третий способ работы предусматривает ис-

пользование распределительной плиты (рис. XIV.5). Для сокращения времени выхода установки на режим при изменении условий эксплуатации нижняя часть аппарата (20—30% пучка труб) может быть затоплена жидким хладагентом.

Современные крупные установки синтеза аммиака производительностью 1360 т в сутки, работающие по методу каталитического реформинга, оборудуют двухкорпусными аммиачными центробежными компрессорами, приводимыми во вращение паровой турбиной. Рабочий водяной пар для турбины генерируется в аппаратах технологического цикла производства. Для первоначального

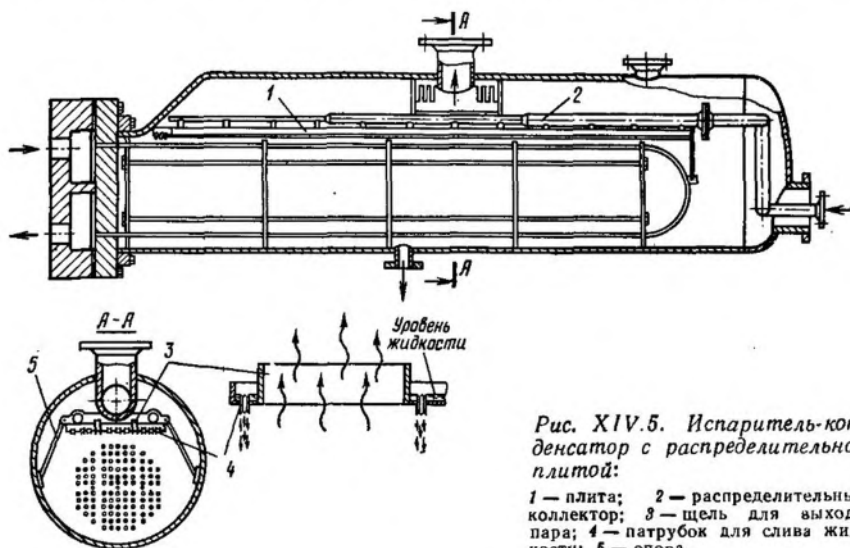


Рис. XIV.5. Испаритель-конденсатор с распределительной плитой:

1 — плита; 2 — распределительный коллектор; 3 — щель для выхода пара; 4 — патрубок для слива жидкости; 5 — опора.

запуска установок используют водяной пар, полученный в специальном парогенераторе при сжигании природного газа. Искусственное охлаждение технологических продуктов осуществляется в результате кипения аммиака при температурах -33 , $-12,1$ и 13°C . Промежуточное охлаждение и конденсация паров аммиака, сжимаемых центробежным компрессором, реализуют в аппаратах, охлаждаемых воздухом. Тепловой поток только в блоке конденсации аммиака для такой установки составляет 17 000 кВт при температуре конденсации 54°C . Особенностью современных крупноблочных агрегатов синтеза аммиака является то, что для их эксплуатации не требуется подключения установок к внешним электрическим сетям и использования охлаждающей воды.

Кроме производства аммиака искусственный холод в азотной промышленности применяют также в технологических процессах получения азотной кислоты. В этом случае для охлаждения обычно используют рассол с температурой $-10 \div -15^{\circ}\text{C}$. Как правило, на предприятиях азотной промышленности требуется осуществление не всего замкнутого холодильного цикла, а лишь его отдельных звеньев, таких, как сжатие и конденсация паров аммиака или, наоборот, газификация жидкого аммиака.

ПРОИЗВОДСТВО СИНТЕТИЧЕСКОГО КАУЧУКА

Процесс получения любого синтетического каучука¹ состоит из двух стадий: синтеза мономера и синтеза полимера. В основе синтеза каучуков лежит полимеризация непредельных углеводородов (мономеров), т. е. органических

¹ Наиболее широкое распространение получили дивиниловый и изопреновый каучуки регулярного строения,

соединений, в которых атомы углерода связаны не одной, а двумя или тремя валентностями. В результате полимеризации получается новое вещество — полимер. В отличие от мономеров, являющихся, как правило, жидкостями или газами, полимеры в основном твердые вещества. В последнее время в качестве мономеров применяют дивинил, изопрен, хлорпрен, изобутилен, стирол и др.

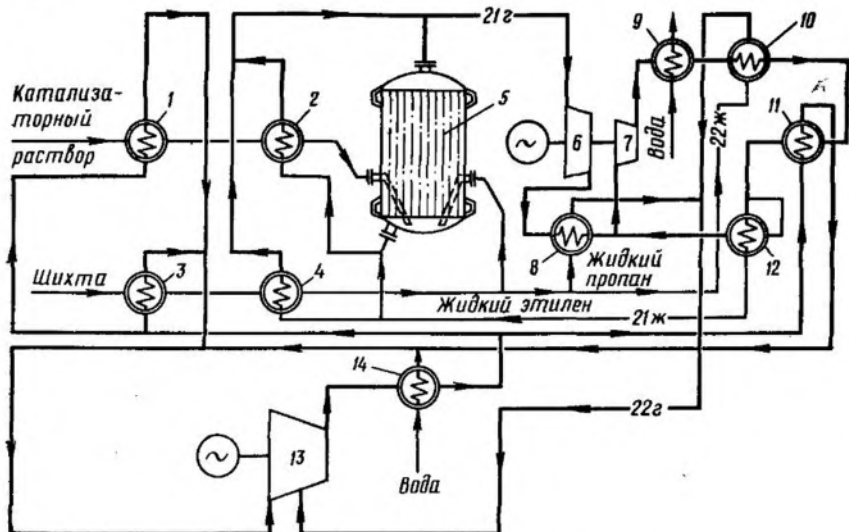


Рис. XIV.6. Принципиальная схема холодильной установки для получения холода при -110 , -41 и 0°C :

1, 2, 3, 4 — технологические аппараты; 5 — полимеризатор; 6, 7 — ступени низкого и высокого давления этиленового центробежного компрессора; 8 — межступенчатый холодильник; 9, 10 — холодильники паров этилена; 11 — конденсатор-испаритель этилена; 12 — переохладитель жидкого этилена; 13 — пропановый турбокомпрессор; 14 — горизонтальный кожухотрубный конденсатор.

При производстве дивинилстирольных и дивинилметилстирольных каучуков полимеризацию проводят в эмульсиях при 5°C в батарее, состоящей из 12 последовательно соединенных аппаратов с мешалками — полимеризаторов, снабженных охлаждающей рубашкой и змеевиком. В качестве теплопроводящей среды используют водные растворы хлористого натрия или хлористого кальция, а также хладагенты. Расход холода для производства 1 т синтетического каучука составляет $170\text{--}230$ кВт·ч при температуре кипения -20°C .

Другой тип каучука, для производства которого требуется значительный расход холода, бутылкаучук — продукт совместной полимеризации изобутилена с изопреном. Протекает эта реакция при температуре -100°C в специальных полимеризаторах. Хладагент испаряется при температуре -110°C в межтрубном пространстве, а шихта и катализаторный раствор поступают в полимеризатор при температурах -98°C и -93°C , где охлаждаются до -100°C .

Для получения температуры -110°C применяют каскадную схему с использованием центробежных компрессорных холодильных машин, работающих на этилене и пропане. Схема каскадной холодильной установки показана на рис. XIV.6. В этиленовом цикле применен двухкорпусной центробежный компрессор мощностью 1750 кВт при температурах кипения -110°C и конденсации -35°C . Пары этилена при температуре -110°C из полимеризатора 5 поступают в ступень низкого давления 6 центробежного компрессора, где сжимаются до давления 561 кПа и направляются в промежуточный холодильник 8 для охлаждения до 5°C кипящим пропаном. Пары этилена, выйдя из холо-

дильника, смешиваются с парами этилена, имеющими температуру -67°C и поступающими из переохладителя 12 и, достигнув температуры -5°C , направляются в ступень высокого давления 7 центробежного компрессора. Сжатые до 171 кПа пары этилена охлаждаются вначале до 40°C в холодильнике 9, а затем до 5°C — в холодильнике 10, после чего поступают в вертикальные кожухотрубные конденсаторы-испарители 11.

В трубках конденсатора-испарителя 11 кипит пропан при температуре -41°C , конденсируя пары этилена. Пройдя переохладитель 12, этилен с температурой -62°C подается к полимеризатору 5 и аппаратам 2 и 4 для охлаждения технологических продуктов.

Пары пропана, образовавшиеся в трубках конденсатора-испарителя 11, всасываются пропановым турбокомпрессором 13. В промежуточную ступень этого турбокомпрессора поступает с температурой 0°C пары пропана, испарившегося в холодильниках 8 и 10. Конденсация паров пропана осуществляется в конденсаторе 14.

Сжиженный пропан подается к технологическим аппаратам, потребляющим холод при 0°C , к технологическим аппаратам 1 и 3, использующим холод при температуре -41°C , испарителям-конденсаторам 11 и промежуточным холодильникам этиленового центробежного компрессора.

Центробежные компрессоры автоматизированы, производительность их регулируется в пределах 70—100% номинальной производительности.

Современные заводы синтетического каучука строят в комплексе с нефтеперерабатывающими предприятиями, являющимися поставщиками исходных продуктов. Холодильные установки их достигают мощности десятков тысяч киловатт при разных температурах кипения рабочих веществ.

СЖИЖЕНИЕ ПРИРОДНОГО ГАЗА

При сжижении природного газа, который на 95% состоит из метана, осуществляются его осушка, очистка, обогащение метаном и получение гелия.

Газ конденсируется при температуре $-85 \div -90^{\circ}\text{C}$, а образовавшаяся жидкость дросселируется до давления, соответствующего температуре $-150 \div -160^{\circ}\text{C}$. Для реализации процесса сжижения при указанных температурах применяют каскадные пароконденсационные машины. В нижней ветви каскада используют этилен, в верхней — аммиак или пропан.

Обычно газ, поступающий из магистрали при давлении $2 \cdot 10^6$ Па, очищается от влаги и примесей и сжимается до давления $5,1 \cdot 10^6$ Па. Охлажденный водой, пройдя рекуперативный теплообменник, газ поступает в испаритель-конденсатор, где конденсируется кипящим этиленом при температуре -87°C . Затем образовавшаяся жидкость охлаждается с помощью рециркуляционного газа до температуры -96°C и дросселируется до давления $0,18 \cdot 10^6$ Па, соответствующего температуре -154°C .

Схема каскадной холодильной машины представлена на рис. XIV.7. Пары этилена сжимаются от давления $0,15 \cdot 10^6$ Па до $2,8 \cdot 10^6$ Па в двухступенчатом компрессоре 1 и направляются в испаритель-конденсатор 6, где конденсируются в результате кипения аммиака. Из конденсатора жидкий этилен с температурой -20°C проходит через регулирующий вентиль, в котором дросселируется до давления $0,58 \cdot 10^6$ Па, соответствующего температуре -67°C .

После теплообмена с парами метана, выходящими из второй испарительной колонны, в теплообменнике 8 этилен вторично дросселируется до $0,15 \cdot 10^6$ Па и при температуре -97°C кипит в испарителе-конденсаторе 9, конденсируя газообразный метан. Затем пары этилена, пройдя теплообменник 10, в котором они перегреваются в результате теплообмена с парами метана, поступают на повторное сжатие.

Для предотвращения повышения давления в системе при остановке холодильной машины в схеме предусмотрена расширительная емкость 11.

В верхней ветви каскада использованы теплообменник 18, в котором жидкий аммиак охлаждается в результате теплообмена с газообразным метаном, а также рекуперативный теплообменник 5, где пары аммиака, поступающие из испарителя-конденсатора, перегреваются до -1°C .

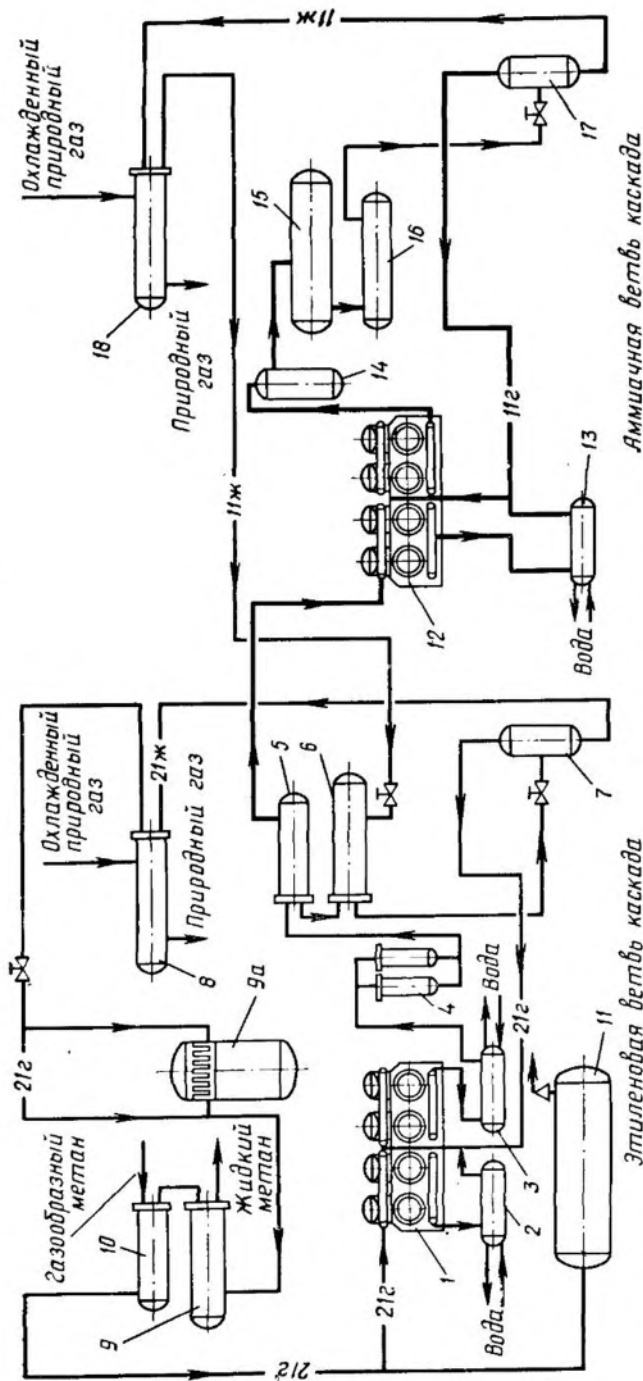


Рис. XIV.7. Принципиальная схема каскадной холодильной установки, обслуживающей станцию сжижения:
 1 — газомотокомпрессор для сжатия этилена; 2 — промежуточный водяной холодильник; 3 — конечный холодильник; 4 — маслоотделитель;
 5 — теплообменник аммиачно-этиленовый; 6 — конденсатор-испаритель; 7 — отделитель жидкости; 8 — теплообменник для переохлаждения
 жидкого этилена охлажденным газом; 9 — испаритель-конденсатор; 9а — конденсационно-отпарная колонна; 10 — теплообменник для пере-
 грева паров этилена; 11 — емкость газомотокомпрессора для сжатия аммиака; 12 — газомотокомпрессор для сжатия аммиака; 13 — промежуточный водяной
 холодильник; 14 — маслоотделитель; 15 — конденсатор; 16 — ресивер; 17 — отделитель жидкого аммиака; 18 — теплообменник для переохлаж-
 дения жидкого аммиака охлажденным газом.

В качестве компрессоров используют газомотокомпрессоры, работающие на природном газе. Ориентировочный расход энергии на сжижение 1000 м³ газа составляет 380 кВт·ч.

ПОЛУЧЕНИЕ СМАЗОЧНЫХ МАСЕЛ ИЗ НЕФТЕПРОДУКТОВ

При производстве высококачественных масел, имеющих низкие температуры застывания, из масляных фракций необходимо удалять парафины. Этот процесс осуществляют в охлаждаемых теплообменниках-кристаллизаторах, куда подают специальные растворители (кетон, толуол, бензол) вместе с маслом.

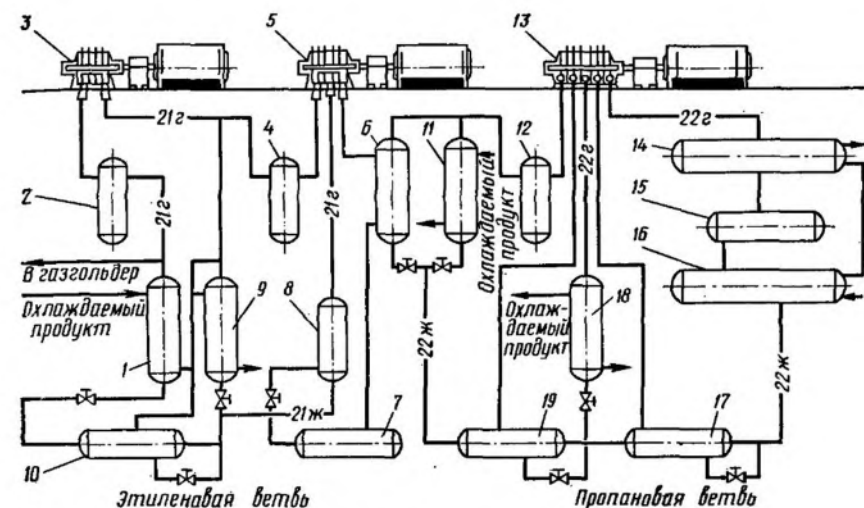


Рис. XIV.8. Схема холодильной установки для глубокой депарафинизации (каскад этилен-пропан):

1 — испаритель этиленовый; 2 — отделитель жидкого этилена; 3 — центробежный компрессор нижней ступени; 4 — отделитель жидкого этилена; 5 — центробежный компрессор верхней ступени; 6 — конденсатор-испаритель; 7 — ресивер жидкого этилена; 8 — отделитель жидкого этилена; 9 — испаритель этиленовый (промежуточный отбор холода); 10 — переохладитель жидкого холодильного агента; 11 — испаритель пропановый; 12 — отделитель жидкого пропана; 13 — центробежный компрессор пропановый; 14 — конденсатор; 15 — ресивер; 16 — переохладитель жидкого пропана; 17 — переохладитель жидкого хладагента; 18 — испаритель пропановый (промежуточный отбор холода); 19 — переохладитель жидкого хладагента.

Обычно исходное сырье и растворитель охлаждают до $-25 \div -35^\circ\text{C}$ с помощью аммиачных холодильных установок непосредственного охлаждения с температурами кипения $-33 \div -45^\circ\text{C}$. Перед поступлением в кристаллизатор, охлаждаемый аммиаком, смесь сырья и растворителя проходит через ряд последовательно включенных кристаллизаторов, охлаждаемых обратным потоком депарафинированного масла. В качестве генераторов холода используют двухступенчатые холодильные машины с безнасосными системами охлаждения. Установки оборудуют устройствами, предотвращающими попадание жидкого хладагента в компрессоры, и средствами регулирования производительности холодильных машин.

Для получения трансформаторного, автомобильного и других масел депарафинизацию осуществляют при температуре продукта -60°C . В таких установках применяют каскадные холодильные машины с использованием искусственного холода на двух температурных уровнях: нижняя ветвь при

температуре от -70 до -75°C и верхняя при температуре от -40 до -45°C . В качестве рабочих веществ используют в нижней ветви этилен, в верхней — аммиак или пропан. Пары этилена с температурой -101°C всасываются турбокомпрессором 3 (рис. XIV.8) из испарителя 1. Сжатый до промежуточного давления хладагент смешивается с парами, выходящими при температуре -72°C из переохладителя 10 и испарителя 9, и поступает в верхнюю ступень центробежного компрессора, а затем в испаритель-конденсатор 6.

В верхнем каскаде предусмотрено использование холода на трех температурных уровнях: в испарителе-конденсаторе 6 при температуре -72°C , в испарителе 11 при температуре $-34,5^{\circ}\text{C}$ и в испарителе 18 при температуре $-9,8^{\circ}\text{C}$. Холодопроизводительность такой установки при температуре -101°C составляет 580 кВт; при $-72,6^{\circ}\text{C}$ — 750 кВт, при $-9,8^{\circ}\text{C}$ — 1600 кВт.

В последнее время в установках депарафинизации масел в качестве растворителя используют жидкий пропан. При выпаривании пропана из раствора температура его понижается и выделяются кристаллы парафина.

ПОЛУЧЕНИЕ КРИСТАЛЛОВ ИЗ РАСТВОРОВ

Процесс кристаллизации¹ состоит из двух стадий: возникновение кристаллов и их рост до необходимых размеров. Движущей силой обеих стадий процесса кристаллизации является пересыщение раствора, которое достигается путем применения искусственного охлаждения в кристаллизаторах периодического и непрерывного действия (рис. XIV.9 и XIV.10). В качестве охлаждающей среды применяют воду, растворы солей в воде и аммиак. В аппаратах непрерывного действия по мере перемещения раствора его пересыщение возрастает вследствие охлаждения. Зародыши кристаллов под действием гравитационных сил оседают в движущемся им навстречу свежем растворе, что способствует росту существующих кристаллов и образованию новых центров кристаллизации.

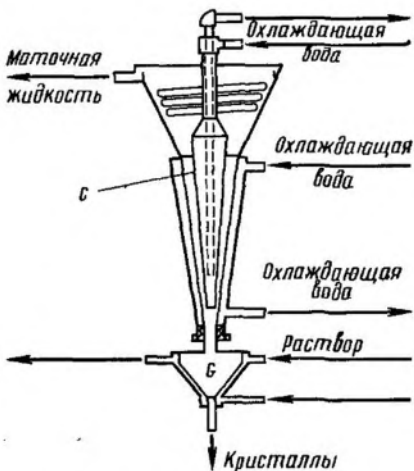


Рис. XIV.9. Кристаллизатор.

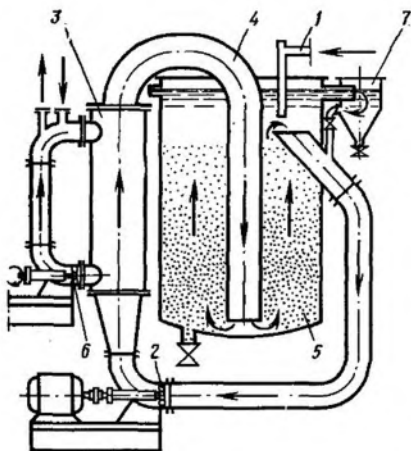


Рис. XIV.10. Кристаллизатор непрерывного действия:

1 — входной патрубок; 2 — циркуляционный насос; 3 — холодильник; 4 — нагнетательный трубопровод; 5 — сосуд; 6 — дроссельный клапан; 7 — сепаратор.

¹ Кристалл характеризуется тем, что его составные части (атомы или ионы) расположены в строгом порядке в так называемых пространственных решетках.

Для получения однородного продукта процесс кристаллизации регулируют путем реализации стадии пересыщения раствора в одной части непрерывно действующего аппарата, а стадии образования кристаллов — в другой. Раствор поступает в аппарат по патрубку 1 (см. рис. XIV.10) и в холодильнике 3 пересыщается вследствие отвода теплоты хладагентом или рассолом. Циркуляционным насосом 2 раствор подается по трубе 4 в сосуд 5, в котором выпадают кристаллы.

Образующиеся кристаллы циркулируют с раствором до тех пор, пока скорость их осаждения не станет больше скорости циркулирующего раствора. Таким образом, в сосуде 5 происходит распределение кристаллов по размерам. Величину кристаллов регулируют, изменяя скорость циркуляции раствора и скорость отвода теплоты в холодильнике 3. Для отделения образующихся в небольшом количестве мелких кристаллов предназначен сепаратор 7.

Для выделения кристаллов из раствора, например сернокислого натрия (глауберовой соли), его охлаждают до -5°C , при которой соль практически не растворяется в воде. При кристаллизации 1 кг соли выделяется 234 кДж теплоты. Расход холода для охлаждения 1 м³ раствора, в котором содержится 300 кг глауберовой соли, составляет около 130 000 кДж.

В установке, перерабатывающей 300 м³ раствора в час (калийная шахта, ГДР) используется холодильная установка мощностью свыше 10 000 кВт при температуре кипения аммиака -15°C . Мощность холодильной станции для получения сернокислого натрия из раствора залива Кара-Богаз-Гол (Каспийское море) достигает 25 000 кВт при температуре кипения хладагента -5°C .

ПРОИЗВОДСТВО ИСКУССТВЕННОГО ВОЛОКНА

На предприятиях для производства искусственного волокна используют воду, охлажденную в основном до $4-8^{\circ}\text{C}$, поэтому холодильные устройства целесообразно применять лишь в периоды года, характеризующиеся повышенными температурами воздуха. Предпочтительно использование абсорбционных (водо-аммиачных и бромистолитиевых) холодильных машин, работающих на низко-температурных источниках тепловой энергии.

При производстве вискозы и вискозного штапельного волокна необходимо охлаждать едкий натр, используемый для пропитки целлюлозы; поддерживать определенную температуру в процессе созревания алкалицеллюлозы; поддерживать заданную температуру в измельчителе целлюлозы; отводить теплоту реакции ксантогенирования; охлаждать растворители, в которых ксантогенот превращается в жидкую массу — вискозу; обеспечивать хранение вискозной массы.

Для реализации указанных технологических процессов используют рассолы с температурами -5 ÷ -8°C и воду с температурой $5-8^{\circ}\text{C}$. Мощность холодильной установки для предприятия производительностью 30 т в сутки составляет около 2500 кВт.

В процессе производства капрона и лавсана для кондиционирования воздуха требуется охлажденная вода с температурой $4-5^{\circ}\text{C}$.

Для изготовления капронового волокна в количестве 1,5 т в час необходима холодильная установка мощностью 35 000 кВт.

При выработке ацетатной ткани используют воду также с температурой $5-8^{\circ}\text{C}$.

ПОЛУЧЕНИЕ ФОТОМАТЕРИАЛОВ

Искусственный холод используют при изготовлении основы и эмульсии светочувствительной пленки, нанесении светочувствительного слоя на основу и поддержании заданных параметров воздуха в производственных помещениях.

При изготовлении основы пленки требуется поддерживать температуру -22 ÷ -24°C . Осушают пленку в отливочных машинах воздухом, обработанным в кондиционерах, охлаждаемых водой с температурой 4°C . В качестве

охлаждающей среды для формирования основы пленки используют этиленгликоль. Этиленгликоль применяют также при студении (-2°C), хранении (3°C) эмульсии и студении эмульсионного слоя, нанесенного на основу (3°C).

Расход холода на реализацию технологических процессов зависит от вида продукции. Так, для изготовления одного километра черно-белой негативной пленки шириной 35 мм необходимо отвести 145 тыс. кДж, а цветной негативной пленки — 420 тыс. кДж теплоты. Обычно при производстве фото-материалов применяют крупные одно- и двухступенчатого сжатия паровые холодильные машины в комплексе со стандартными теплообменными аппаратами.

ИСКУССТВЕННЫЕ ЛЕДЯНЫЕ КАТКИ

По назначению различают следующие типы катков: для фигурного катания при площади льда около 200 м^2 для каждого спортсмена; беговые дорожки шириной 5 м и длиной около 400 м; хоккейные поля с размерами ледяной арены 60×30 м; общественные катки, площадь которых определяется в зависимости от количества конькобежцев, исходя из нормы 3 м^2 для одного спортсмена. Катки устраивают под открытым небом или в закрытых помещениях.

В последнее время находят распространение многоцелевые открытые ледовые стадионы площадью до 15 тыс. м^2 , такие, как спортивный комплекс Медео, открытый искусственный каток в Осло (Норвегия) и др. Наряду с этим применяют передвижные катки небольшой площади, которые можно быстро устанавливать и демонтировать.

Конструкции ледяных катков. Одним из основных элементов катка является ледяное поле. Ледяной каток конструкции ВНИИХИ состоит из аккумуляционных плит размером $15,5 \times 0,94 \times 0,72$ м, заполненных эвтектическим раствором хлористого калия. Для охлаждения раствора внутри плит установлены ребристые трубы, в которых кипит аммиак. Внешняя поверхность плит поливается водой, которая превращается в лед толщиной до 40 мм. Данная конструкция основания катка позволяет приготовить ледяное поле с ровной поверхностью льда, имеющего одинаковую твердость по всей площади поля. Вместе с тем такая конструкция сложна в изготовлении и монтаже. Более распространены катки, основание которых представляет собой выровненную утрамбованную площадку с уложенными на ней деревянными брусками (рис. XIV.11). Пространство между брусками заполняют песком, а к брускам крепят стальные трубы диаметром 25—45 мм с шагом до 100 мм.

В некоторых конструкциях на бруска укладывают металлический каркас, к которому прикрепляют трубы. Этот каркас покрывают железобетонными плитами толщиной 30—40 мм. Пространство между трубами заполняют песком. Иногда основание поля представляет собой монолитную железобетонную плиту толщиной 140 мм. В таких плитах обычно используют самонапряженный бетон либо бетонный слой отделяют от основания катка. Для улучшения теплопроводности в бетонную плиту добавляют металлические опилки или стружку, а между основанием и плитой укладывают слой изоляции.

В настоящее время распространены катки с основанием, выполненным из песчано-гравийной смеси, на которую укладывают полиэтиленовые или стальные трубы. Сверху трубы засыпают песком или кирпичной крошкой. Во избежание промораживания грунта основание катка снабжают дренажным устройством. В местности с высоким уровнем грунтовых вод над грунтом предусматривают воздушную прослойку толщиной 200—300 мм. Теплота от ледяных полей отводится непосредственно хладагентом либо вторичным хладоносителем. Для получения равномерного температурного поля хладагент или хладоноситель распределяется по теплоотводящим элементам через секционные коллекторы, расположенные обычно вдоль длинных сторон прямоугольника поля.

Предпочтительно использование систем с вторичным хладоносителем, что определяется требованиями безопасности, высокой стоимостью хладагентов, трудностью геометизации соединений и арматуры элементов разветвленных коммуникаций катка.

Расчет ледяных катков. При проведении calorических расчетов учитывают тип катка (открытый, закрытый) и климатические данные зоны располо-

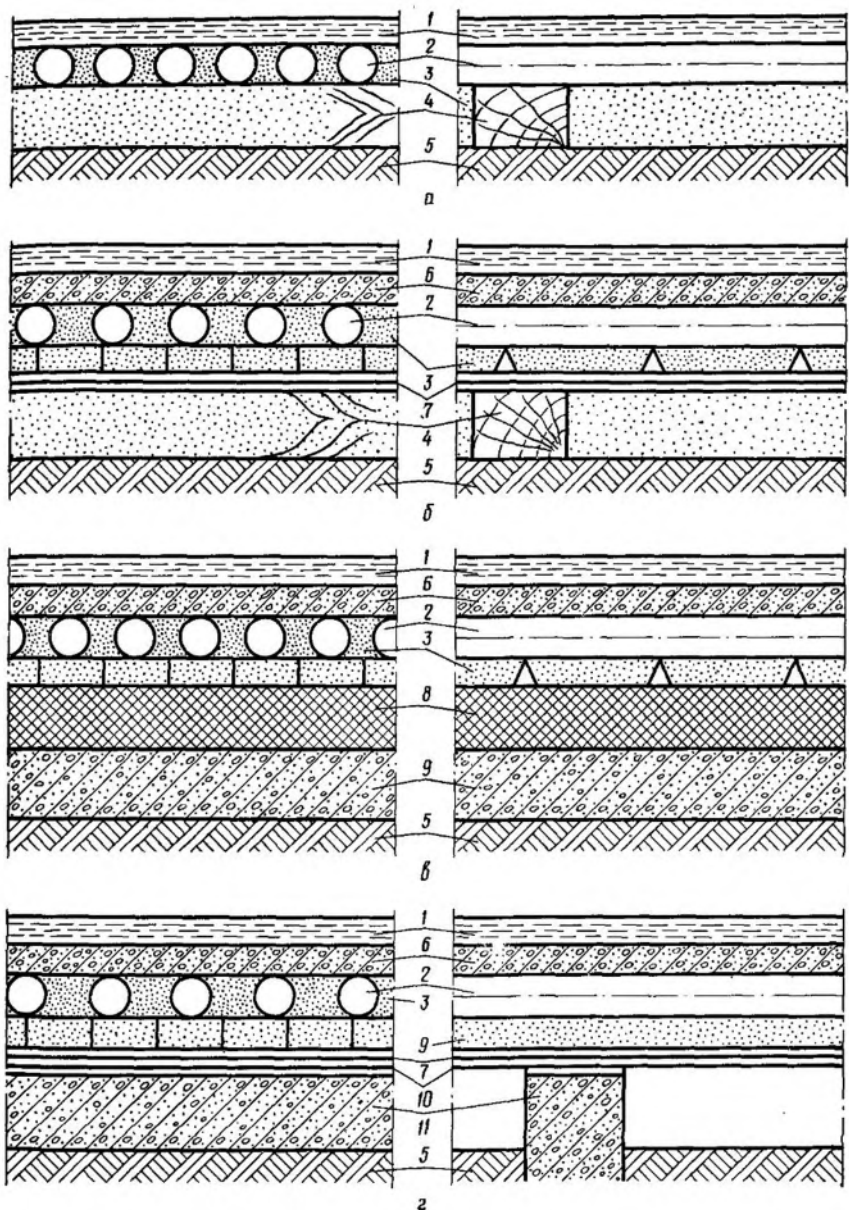


Рис. XIV.11. Основные конструкции искусственных ледяных катков:

а — с песчаной постелью; б — с металлическими опорами для труб; в — с изоляционным основанием катка; г — с воздушным пространством над основанием катка;
 1 — слой льда; 2 — трубы; 3 — песчаная постель; 4 — брусья; 5 — грунт; 6 — плиты; 7 — рубероид; 8 — изоляция с паровоизолятором; 9 — бетонная подготовка; 10 — стальные листы; 11 — опорные балки.

жения сооружения. Температуру воздуха над ледяной поверхностью принимают равной среднемесячной температуре воздуха в период работы катка. Среднюю температуру льда для игры в хоккей принимают равной -4°C , для фигурного катания -2°C и для скоростного бега на коньках — от -1 до -3°C . Неравномерность температуры поверхности льда не должна превышать $0,5^{\circ}\text{C}$.

Наряду с отводом тепловых потоков от окружающей среды холодильное оборудование должно обеспечивать намораживание льда на площади катка за $12-16$ ч.

При расчете плотности теплового потока, отнесенного к 1 м^2 площади поверхности ледяного поля катка, учитывают следующие теплопоступления:

1) из окружающего воздуха (в $\text{Вт}/\text{м}^2$) $q_1 = \alpha(t_{\text{в}} - t_1)$, где α — коэффициент теплоотдачи от воздуха ко льду, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$; $t_{\text{в}}$ — температура воздуха над поверхностью льда, $^{\circ}\text{C}$; t_1 — температура льда, $^{\circ}\text{C}$;

2) от конденсации и замерзания влаги воздуха (в $\text{Вт}/\text{м}^2$) $q_2 = (d - d'')r \cdot \sigma \cdot 10^{-3}$,

где d — влагосодержание воздуха, $\text{кг}/\text{кг}$; d'' — влагосодержание воздуха в пограничном слое при средней температуре поверхности льда, $\text{кг}/\text{кг}$; r — теплота конденсации водяных паров с учетом теплоты замерзания влаги, $\text{кДж}/\text{кг}$; σ — коэффициент испарения, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; $\sigma = 0,00694 - 0,00833 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$

3) от грунта к ледяному полю $q_3 = k(t_{\text{гр}} - t_0)$,

где k — коэффициент теплопередачи изоляции ледяного поля, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$; $t_{\text{гр}}$ — температура грунта, песка, бетона, $^{\circ}\text{C}$; t_0 — температура эвтектического раствора, $^{\circ}\text{C}$; t_0 определяется как средняя температура кипения хладагента либо средняя температура рассола или замерзания эвтектического раствора.

Для открытых катков учитывают теплоту солнечной радиации $q_4 = 0,5q_R$, где $q_R = 640 \text{ Вт}/\text{м}^2$ — расчетное напряжение солнечной радиации для летнего периода при падении лучей на горизонтальную поверхность.

Коэффициент $0,5$ учитывает долю теплоты солнечной радиации, отраженной от поверхности льда.

Прочие эксплуатационные теплопоступления составляют обычно $10-20\%$ от общего теплового потока. Плотность теплового потока для закрытого катка составляет $400-470 \text{ Вт}/\text{м}^2$, для открытого — $230-350 \text{ Вт}/\text{м}^2$ зимой и около $600 \text{ Вт}/\text{м}^2$ летом.

Глава XV

ВОДНЫЙ ЛЕД

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Естественный лед образуется в водоемах, на реках при замерзании в них воды в период зимних холодов. Плотность льда зависит от его температуры, количества и размеров замороженных пузырьков воздуха. В среднем плотность естественного льда $0,92 \text{ т}/\text{м}^3$, т. е. значительно меньше плотности воды. Объемная масса льда зависит от размера кусков: у крупных льдин — $0,8 \text{ т}/\text{м}^3$, у кусков размером 10 см — около $0,5 \text{ т}/\text{м}^3$.

При атмосферном давлении лед тает при 0°C . При повышении давления температура таяния понижается. Теплота таяния льда составляет $335 \text{ кДж}/\text{кг}$. Теплоемкость льда зависит от его температуры: при температурах от 0 до -20°C с достаточной точностью можно принять теплоемкость льда равной $2,2 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$. Теплопроводность льда также зависит от его температуры: при температурах до -20°C она составляет $2,32 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$. В настоящее время, несмотря на широкое распространение других способов охлаждения, водный лед продолжает широко применяться в различных отраслях народного хозяйства.

Отличительными особенностями водного льда являются небольшие затраты, связанные с его заготовкой, а также значительная аккумулирующая способность, позволяющая использовать лед в относительно теплые периоды времени.

Основные способы заготовки естественного льда: вырезка или выколка его из водоемов; послойное намораживание на горизонтальных площадках;

наращивание ледяных сосулек на градирнях. Выбор способа заготовки льда зависит от местных и климатических условий. В южных районах, где заготовка естественного льда затруднена, лед вырабатывают с помощью льдогенераторов.

В зависимости от состава исходного сырья выпускают *искусственный водный лед* следующих видов: из пресной воды (сырой, кипяченой, дистиллированной); из морской воды и рассолов; из воды с антисептиками и антибиотиками.

При изготовлении искусственного льда из пресной воды предъявляют специальные, в частности гигиенические (санитарные), требования к сырью (вода), продукту (лед), а также к оборудованию к процессу производства.

Лед из питьевой водопроводной воды изготовляют матовым с плотностью $\rho_0 = 690 \div 900 \text{ кг/м}^3$ и прозрачным с $\rho_0 = 910 \div 917 \text{ кг/м}^3$ при температурах от -8 до -25 °С. Матовый лед имеет белый цвет в основном благодаря наличию в нем лузьярьков воздуха и солей. Прозрачный лед в толстом слое имеет голубовато-зеленый оттенок, он мало смерзается и не дает осадка при растаивании.

На действующих холодильниках можно вырабатывать искусственный водный лед за счет резервной производительности холодильных установок. Лед накапливают в льдохранилищах, а затем расходуют его в периоды наибольшего потребления холода. Основными потребителями льда являются рыболовные суда и вагоны-ледники, перевозящие скоропортящиеся продукты на большие расстояния, а также пищевая промышленность, торговые предприятия и сельское хозяйство. Лед применяют для быстрого охлаждения ряда ценных сортов ягод и плодов на месте их сбора и при транспортировке. Его широко используют в торговле, в мясной, молочной, кондитерской и других отраслях пищевой промышленности.

В последнее время стали применять естественный лед при строительстве плотин, гидроэлектростанций и других сооружений. Большое распространение естественный лед получил в установках с льдосоляным охлаждением.

ОСНОВЫ ЛЬДОТЕХНИКИ.

Физические основы образования льда

Возможны два случая образования льда при охлаждении воды: первый, когда в воде отсутствуют кристаллы льда или ядра для их образования, второй — когда в охлаждаемой воде они присутствуют. Каждый из них имеет особенности образования льда. В первом случае процесс льдообразования характеризуется большой сложностью и еще недостаточно изучен. Во втором случае процесс льдообразования более простой, что позволяет определить количественные зависимости толщины и скорости намораживания льда от условий охлаждения воды и установить, таким образом, степень влияния отдельных факторов на этот процесс.

В холодильной технике льдообразование почти всегда протекает в условиях, когда имеются необходимые предпосылки для возникновения кристаллов льда.

Образование твердой фазы из жидкой начинается только в отдельных точках — центрах кристаллизации. В свою очередь образование первичных центров кристаллизации возможно только при переохлаждении жидкости. Переохлаждение жидкости называют разность температур между температурой плавления твердой фазы и температурой, при которой выделяются первые кристаллы. После появления кристаллов температура жидкости возрастает до температуры плавления. Необходимость переохлаждения вызывается тем, что возникающие группировки (диспергированные кристаллы) с упорядоченным размещением молекул, близким к структуре кристаллов твердой фазы, неустойчивы. Эти группировки в соответствии с квазикристаллическим строением жидкости непрерывно разрушаются под воздействием теплового движения молекул. Когда температура жидкости становится ниже точки плавления, воздействие теплового движения молекул уменьшается.

Однако эти группировки, представляющие собой только несколько молекул с правильной кристаллической ориентировкой, остаются неустойчивыми и в условиях переохлаждения. Кристаллическая группировка становится устой-

чивой только тогда, когда в ней содержится несколько сот молекул. Образование такой группировки не может происходить самопроизвольно: оно требует содержания в жидкости твердых частиц. Стабильность этих групп может возникнуть только на поверхности раздела жидкости и твердых частиц, так как здесь имеется пленка жидкости, обладающая особыми свойствами молекулярной ориентации, отличающими ее от остальной массы жидкости.

При движении воды у охлаждаемой стенки первые кристаллы должны выделяться в виде тонкого слоя льда, так как у нее находится наиболее переохлажденная пленка жидкости, обладающая свойствами молекулярной организации, необходимыми для образования устойчивых группировок.

Наиболее благоприятными условия будут тогда, когда теплопередающая стенка по структуре своей поверхности приближается к структуре кристаллов льда и когда теплопередача через стенку проходит интенсивно. Поэтому шероховатые металлические стенки, особенно медные, при интенсивном охлаждении создают более благоприятные условия для образования первых кристаллов льда, чем гладкие и полированные, особенно стеклянные, при медленном их охлаждении.

При интенсивном охлаждении воды с температурой выше 0°C у металлической стенки образуется тонкий сплошной слой льда. Переохлаждение воды резко падает до тысячных долей градуса (практически можно считать, что переохлаждение отсутствует). Температура поверхности льда Θ_0 на границе с водой в течение всего дальнейшего процесса охлаждения ее остается постоянной и равной 0°C . Действительно, температура плавления льда при атмосферном давлении не может быть выше 0°C , так как известно, что иметь двойную фазу вещество в перегретом состоянии не может. С другой стороны, температура может понижаться лишь на тысячные доли градуса. Таким образом, практически температура льда на границе может быть принята равной 0°C .

Эта важная особенность процесса намораживания льда у охлаждаемой стенки, омываемой водой, позволяет получить сравнительно простые расчетные зависимости, характеризующие динамику намораживания льда в воде плюсовой температуры.

Теплопередача и льдообразование у охлаждаемых стенок

Тепловой поток от воды к поверхности льда. Рассмотрим условия теплообмена между водой, слоем льда, стенкой и охлаждающей средой (рис. XV.1). При этом будем считать, что температура воды $t_1 > 0^{\circ}\text{C}$, а температура хладагента $t_2 < 0^{\circ}\text{C}$.

В определенный момент времени t_1 у теплопередающей стенки слой льда имеет толщину $\delta_{л1}$. Коэффициент теплопроводности слоя льда $\lambda_{л}$, металлической стенки $\lambda_{м}$. Толщина стенки $\delta_{м}$. Коэффициент теплоотдачи от воды к поверхности льда α_1 , от стенки к хладагенту — α_2 .

Тепловой поток от воды к поверхности льда состоит из суммы конвективного теплового потока q_1 , вызываемого разностью температур жидкости t_1 , поверхности льда Θ_0 и теплового потока q_2 , эквивалентного работе трения при движении воды у охлаждаемой стенки.

В условиях естественной циркуляции воды тепловой поток $q_2 = 0$. При этом тепловой поток (в Вт/м²), поступающий от воды, $q_1 = \alpha_1(t_1 - \Theta_0)$.

Тепловой поток, образуемый в результате работы сил трения, в случае принудительного движения воды

$$q_2 = r\omega_1, \quad (\text{XV.1})$$

где r — сила трения при движении воды у стенки, приходящаяся на 1 м² теплопередающей поверхности (напряжение силы трения), Н/м²; ω_1 — скорость движения воды, м/с.

Рис. XV.1. Процесс намораживания льда у плоской стенки.

На основании положений о единстве процессов переноса тепловой и механической энергии, установленных академиком Л. С. Лейбензоном, предложена следующая приближенная зависимость между напряжением силы трения p и коэффициентом теплоотдачи α_1 :

$$p = \alpha_1 w_1 \left(2 + \frac{1}{Pr} \right) / 3c_p.$$

Подставляя значение p в формулу (XV.1), получим

$$q_2 = \alpha_1 w_1^2 \left(2 + \frac{1}{Pr} \right) / 3c_p,$$

где Pr — критерий Прандтля; c_p — удельная массовая теплоемкость.

Полное количество теплоты, поступающей от воды на 1 м^2 теплопередающей поверхности льда,

$$q_0 = q_1 + q_2 = \alpha_1 \left[(t_1 - \theta_0) + w_1^2 \left(2 + \frac{1}{Pr} \right) / 3c_p \right]. \quad (\text{XV.2})$$

Эквивалентная температура потока воды

$$t_{\text{экив}} = w_1^2 \left(2 + \frac{1}{Pr} \right) / 3c_p. \quad (\text{XV.3})$$

Тогда выражение (XV.2) будет иметь вид

$$q_0 = (t_1 - \theta_0 + t_{\text{экив}}). \quad (\text{XV.4})$$

Если ввести дополнительное понятие «приведенной температуры»

$$t_{\text{пр}} = t_1 + t_{\text{экив}}, \quad (\text{XV.5})$$

то из формулы (XV.4) получим выражение, определяющее полный тепловой поток, который поступает от воды на поверхность льда, т. е. $q_0 = \alpha_1(t_{\text{пр}} - \theta_0)$.

Таким образом, для определения полного количества теплоты, поступающей от воды на поверхность льда конвективным путем и в результате выделения теплоты, эквивалентной работе сил трения, достаточно действительную температуру воды t_1 заменить «приведенным» ее значением $t_{\text{пр}}$ и тепловой поток определить так же, как и для случая естественной циркуляции воды.

Условия намораживания льда. Чтобы замороженный на охлаждаемой стенке слой льда не плавился под воздействием теплового потока q_0 , поступающего из воды на его поверхность, необходимо отводить теплоту в охлаждаемую среду. Для этого нужно преодолеть тепловое сопротивление, равное

$$\frac{1}{k} = \frac{\delta_{\text{л}}}{\lambda_{\text{л}}} + \frac{\delta_{\text{м}}}{\lambda_{\text{м}}} + \frac{1}{\alpha_2}.$$

Тогда условия намораживания льда у стенки будут следующими.

Лед намораживается, если $\alpha_1(t_{\text{пр}} - \theta_0) < k_1(\theta_0 - t_2)$.

Равновесие наступает, когда толщина льда достигает своего максимального значения $\delta_{\text{л max}}$ для заданных условий теплопередачи, т. е. $\alpha_1(t_{\text{пр}} - \theta_0) = k_1(\theta_0 - t_2)$.

Лед плавится, когда тепловой поток q_0 , поступающий от воды на поверхность льда, превышает тепловой поток q_3 , отводимый в охлаждающую среду, т. е. когда

$$\alpha_1(t_{\text{пр}} - \theta_0) > k_1(\theta_0 - t_2). \quad (\text{XV.6})$$

Плавление льда прекратится, если с уменьшением толщины льда тепловой поток q_3 , отводимый в охлаждающую среду, станет равным тепловому потоку q_0 , поступающему от воды на поверхности льда. Максимальное значение толщины льда $\delta_{\text{л max}}$ находим из предыдущего выражения

$$\delta_{\text{л max}} = \left[\frac{\theta_0 - t_2}{\alpha_1(t_{\text{пр}} - \theta_0)} - \left(\frac{\delta_{\text{м}}}{\lambda_{\text{м}}} + \frac{1}{\alpha_2} \right) \right] \lambda_{\text{л}}, \quad (\text{XV.7})$$

Пользуясь выражением (XV.5), получим следующие условия льдообразования у охлаждаемой стенки. Лед намораживается, если $\delta_{л} < \delta_{л \max}$. Лед плавится при $\delta_{л} > \delta_{л \max}$. Это происходит до тех пор, пока его значение не станет равным $\delta_{л \max}$ для рассматриваемых условий теплопередачи. С помощью выражения (XV.7) можно установить влияние условий теплопередачи на толщину намораживаемого льда у плоской охлаждаемой стенки, омываемой водой.

Намораживание льда у стенки будет тем значительнее, чем ниже температура и интенсивнее теплопередача охлаждающей среды. Значение $\delta_{л \max}$ будет тем меньше, чем выше температура воды и интенсивнее теплоотдача от нее к поверхности льда. Причем в условиях принудительного движения воды влияние скорости на процесс намораживания льда выражается через значение коэффициента теплоотдачи α_1 и эквивалентную температуру, определяемую с помощью выражения (XV.6).

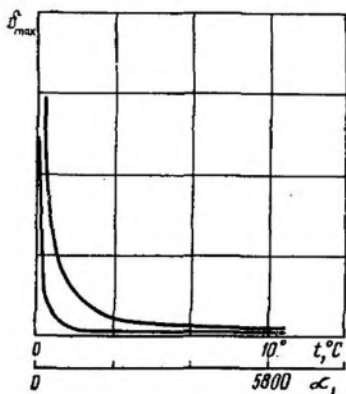


Рис. XV.2. Кривые зависимости максимальной толщины льда от температуры воды и коэффициента теплоотдачи.

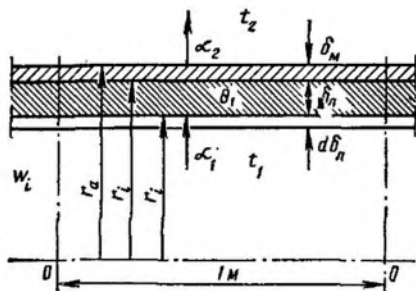


Рис. XV.3. Процесс намораживания льда у цилиндрической стенки.

Значения эквивалентной температуры воды в зависимости от ее скорости приведены ниже:

w	0,1	0,2	0,5	1,0	1,5	2,0
$t_{\text{эkv}}$, °C	0,006	0,024	0,15	0,6	1,35	2,4

Расчетные значения $\delta_{л \max}$ (рис. XV.2) в зависимости от температуры воды приведены ниже:

t_1 , °C	0,05	0,1	0,2	0,5	1	4	10
$\delta_{л \max}$, м	0,80	0,40	0,20	0,08	0,04	0,01	0,003

Значения $\delta_{л \max}$ в зависимости от коэффициента теплоотдачи от воды к поверхности льда α_1 следующие:

α_1 , Вт/(м ² ·К)	150	300	500	1000	2000	5000
$\delta_{л \max}$, м	1,33	0,67	0,4	0,2	0,1	0,04

Здесь $\delta_M = 0,005$ м; $\lambda_M = 46,5$ Вт/(м·К) $\lambda_{л} = 2,3$ Вт/(м·К)

$t_2 = -20$ °C; $\alpha_2 = 3489$ Вт/(м²·К).

Для $\delta_{л \max} \approx f(t_1)$ считают $\alpha_1 = 1163$ Вт/(м²·К); для $\delta_{л \max} = f(\alpha_1)$ принимают $t_1 = 0,2$ °C.

Для условий естественной циркуляции воды значение коэффициента теплоотдачи от воды к поверхности льда находят по формуле А. Г. Ткачева.

При намораживании льда у стенки значение коэффициента теплопередачи определяют следующим образом. Тепловой поток (в Вт/м²), поступающий в охлаждающую среду,

$$q_3 = \frac{\theta_0 - t_2}{(\delta_{\text{л}}/\lambda_{\text{л}}) + (\delta_{\text{м}}/\lambda_{\text{м}}) + (1/\alpha_2)}.$$

Если значение q_3 разделить на разность температур между охлаждаемой и охлаждающей средами, то можно получить выражение для коэффициента теплопередачи [в Вт/(м²·К)] льдогенераторов и водоохладителей в следующем виде:

$$k = (\theta_0 - t_2) / \left[(t_1 - t_2) \left(\frac{\delta_{\text{л}}}{\lambda_{\text{л}}} + \frac{\delta_{\text{м}}}{\lambda_{\text{м}}} + \frac{1}{\alpha_2} \right) \right]. \quad (\text{XV.8})$$

Время намораживания льда. Рассмотрим процесс намораживания льда с момента времени τ_i , которому соответствует состояние, представленное на рис. XV.3. К этому моменту времени толщина льда у стенки достигает значения $\delta_{\text{л}i}$. За время $d\tau$ у единицы поверхности образуется лед толщиной dx , в связи с чем потребуется отвести в охлаждающую среду количество теплоты $dQ_2 = \rho dx$. Здесь ρ — скрытая теплота льдообразования, отнесенная к единице объема намораживания льда, равная $301 \cdot 10^3$ кДж/м³.

За это же время от воды к поверхности льда поступит количество теплоты

$$dQ_1 = (t_{\text{пр}} - \theta_0) \alpha_1 d\tau_i, \quad (\text{XV.9})$$

где $t_{\text{пр}}$ — приведенная температура воды, определяемая с помощью выражений (XV.3) и (XV.5) при естественной циркуляции воды $t_{\text{экр}} = 0$.

Таким образом, полное количество теплоты dQ , которое должно быть отведено за время $d\tau_i$ в охлаждающую среду, составит

$$dQ = dQ_1 + dQ_2 = (t_{\text{пр}} - \theta_0) \alpha_1 d\tau + \rho dx. \quad (\text{XV.10})$$

Указанное количество теплоты должно пройти через слой образовавшегося льда $\delta_{\text{л}i}$ и металлическую стенку толщиной $\delta_{\text{м}}$. Его значение определяют из выражения

$$dQ = \frac{(\theta_0 - t_2) d\tau}{\frac{(\delta_{\text{л}})_i}{\lambda_i} + \frac{\delta_{\text{м}}}{\lambda_{\text{м}}} + \frac{1}{\alpha_2}}.$$

Приравняв первые части выражений (XV.9) и (XV.10), получим дифференциальное уравнение льдообразования у плоской стенки. Разделив переменные и проинтегрировав в пределах от 0 до $\delta_{\text{л}}$, получим расчетное выражение, определяющее время намораживания льда (в с) у охлаждаемой плоской стенки

$$\tau = \frac{\rho}{(t_{\text{пр}} - \theta_0) \alpha_1} \left\{ \delta_{\text{л}} + \frac{\lambda_{\text{л}} (\theta_0 - t_2)}{\alpha_1 (t_{\text{пр}} - \theta_0)} \ln \left[1 - \frac{\delta_{\text{л}}}{\delta_{\text{л макс}}} \right] \right\}, \quad (\text{XV.11})$$

где $\delta_{\text{л макс}}$ — максимальная толщина льда, определяемая из выражения (XV.7).

Если температура воды $t_{\text{пр}} = 0$, то время намораживания льда (в с) у плоской стенки находят из выражения (XV.12), которое получают так же, как и выражение (XV.11)

$$\tau = \frac{\rho \delta_{\text{л}}}{(\theta_0 - t_2)} \left(\frac{\delta}{2\lambda_{\text{л}}} + \frac{\delta_{\text{м}}}{\lambda_{\text{м}}} + \frac{1}{\alpha_2} \right). \quad (\text{XV.12})$$

Таким же образом получают расчетную формулу для времени намораживания льда (в ч) в воде, температура которой у внутренней поверхности охлаждаемой трубы составляет 0 °С, т. е.

$$\tau = \frac{\rho}{2(\theta_0 - t_2)} \left\{ \frac{r_i^2}{\lambda_{\text{л}}} \ln \frac{r_i'}{r_i} - \left(\frac{1}{2\lambda_{\text{л}}} + \frac{1}{\lambda_{\text{м}}} \ln \frac{r_a}{r_i} + \frac{1}{r_a \alpha_2} \right) \right\} [(r_i')^2 - r_i^2]. \quad (\text{XV.13})$$

Формула для определения времени намораживания льда на наружной поверхности охлаждаемой трубы имеет следующий вид:

$$\tau = \frac{-\rho}{2(\theta_0 - t_2)} \left\{ \frac{r_i'}{\lambda_{\text{л}}} \ln \frac{r_i'}{r_a} - \left(\frac{1}{2\lambda_{\text{л}}} - \frac{1}{\lambda_{\text{м}}} \ln \frac{r_a}{r_i} - \frac{1}{\alpha_2 r_a} \right) \right\} (r_i'^2 - r_a^2), \quad (\text{XV.13, а})$$

где r_i' — радиус поверхности льда, омываемой водой; r_a — наружный радиус трубы; r_i — внутренний радиус трубы.

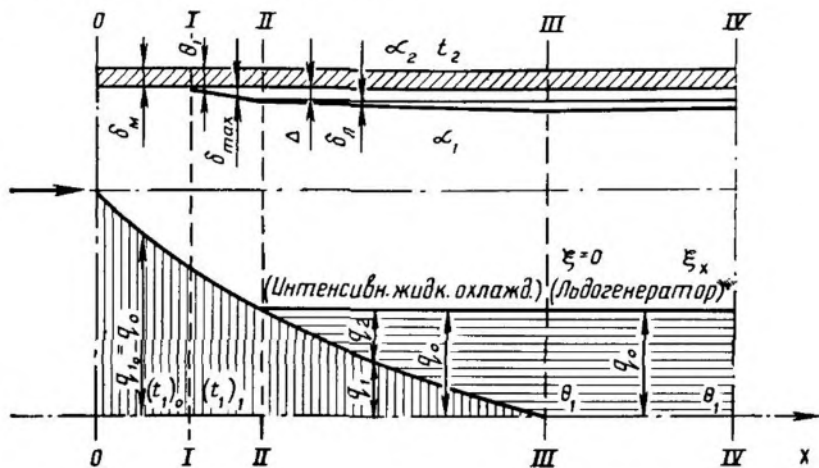


Рис. XV.4. Процесс теплопередачи и льдообразования снежного льда льдогенератора.

Приведенные выше расчетные зависимости процесса намораживания льда у охлаждаемых плоской и цилиндрической стенок позволяют произвести тепловой расчет различных типов льдогенераторов, водоохладителей и других охладителей жидкости, у теплопередающей поверхности которых происходит переход жидкой фазы в твердую. С их помощью можно прогнозировать интенсификацию или замедление процесса намораживания льда.

В качестве примера практического применения полученных расчетных зависимостей и дополнительного выявления особенностей теплопередачи при переходе жидкости в твердую фазу рассмотрим процесс охлаждения воды и льдообразования в льдогенераторе снежного льда (см. рис. XV.6).

Для упрощения выводов предполагаем, что теплопередающая втулка льдогенератора имеет цилиндрическую форму. Тогда условия теплопередачи и льдообразования в ней могут быть представлены следующей схемой (рис. XV.4).

Вода поступает в аппарат через сечение 0 с температурой $(t_1)_0$ и охлаждается в первой зоне 0—I до температуры $(t_1)_1$, при которой температура поверхности стенки в сечении снижается до 0°C . Значение температуры $(t_1)_1$ находят из выражения (XV.7), приравняв $\delta_{\text{л max}}$ к нулю. Протяженность этой зоны и охлаждение в ней воды определяют по обычным формулам теплопередачи.

Вторая зона I—II характеризуется тем, что у ее теплопередающей стенки намораживается лед. Причем толщина его возрастает с понижением температуры воды и в конечном сечении II значение $\delta_{\text{л max}}$ достигает величины зазора между резцом и втулкой. Тепловой поток, вызывающий охлаждение жидкости, циркулирующей в аппарате, $q_1 = [(t_1)_{\text{ср}} - \theta_0] \alpha_1$.

Нижнюю границу II данной зоны находят по значению температуры воды $(t)_{\text{II}}$, которую предварительно определяют из выражения (XV.7) при величине

зазора между резцом и втулкой $\delta_{л \max} = \Delta$. Коэффициент теплопередачи для этой зоны находят из выражения (XV.8).

В третьей зоне (II—III) происходит намораживание льда, срезание его резами, плавление частиц льда, поступающих в циркулирующую воду, и интенсивное охлаждение воды. Вместе с тем температура воды в этой зоне остается положительной и только в конечном сечении III зоны падает до 0°C . Таким образом, в этой зоне вода охлаждается двумя путями: конвективным (тепловой поток q_1) и за счет плавления льда, срезаемого резами (тепловой поток q_2).

Тепловой поток q_1 находят так же, как и для II зоны. Тепловой поток $q_2 = \pi \delta_{л \cdot \text{ср}} \rho r$, где π — частота вращения, с^{-1} ; $\delta_{л \cdot \text{ср}}$ — средняя толщина льда, срезаемого за один оборот, находят ее из выражения (XV.12); ρ — объемная теплота льдообразования, $\text{Дж}/\text{м}^3$.

Важной особенностью охлаждения воды в этой зоне является то, что с понижением ее температуры тепловой поток q_1 в соответствии с разностью температур $t_1 - Q_0$ падает. В то же время тепловой поток q_2 увеличивается, так как с падением температуры воды толщина срезаемого льда возрастает. В результате суммарный тепловой поток $q_0 = q_1 + q_2$ практически по всей длине III зоны остается постоянным и приближенно может быть рассчитан с помощью выражения

$$q_0 = (\theta_0 - t_2) / [(\Delta / \lambda_{л}) + (\delta_{м} / \lambda_{м}) + (1 / \alpha_2)].$$

Здесь не учитывается тепловое сопротивление толщины срезаемого льда, так как оно в льдогенераторах снежного льда при $n = 3 \text{ с}^{-1}$ не превышает сотых долей миллиметра. В то же время зазор между резцом и втулкой составляет около $0,5 - 0,8 \text{ мм}$.

Четвертая зона (III—IV) представляет собой интенсивный льдогенератор, температура воды в котором остается неизменной и равной 0°C . Здесь вся теплота отводится в процессе льдообразования, в результате которого получается смесь воды и снежного льда. По мере движения смеси к выходу из льдогенератора концентрация ее возрастает.

Удельную производительность [в $\text{м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$] льдогенератора IV зоны находят из выражения

$$q_1 = \delta_{л \cdot \text{ср}} n \cdot l,$$

где $\delta_{л \cdot \text{ср}}$ — толщина срезаемого льда в этой зоне, определяемая из выражения

$$\tau_{в \cdot \text{ср}} = \frac{1}{n} = \frac{\rho \delta_{л \cdot \text{ср}}}{\theta_0 - t_2} \left(\frac{\delta_{л \cdot \text{ср}}}{2\lambda_{л}} + \frac{\Delta}{\lambda_{л}} + \frac{\delta_{м}}{\lambda_{м}} + \frac{1}{\alpha_2} \right).$$

Если не учитывать тепловое сопротивление срезаемого льда, то удельную производительность льдогенератора [в $\text{м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$] можно определить с помощью выражения

$$q_1 = (\theta_0 - t_2) / [(\Delta / \lambda_{л}) + (\delta_{м} / \lambda_{м}) + (1 / \alpha_2) \rho].$$

При рассмотрении общего случая теплообмена в льдогенераторе снежного льда имеют место все четыре зоны. Однако одновременное их существование необязательно. В зависимости от условий теплопередачи могут отсутствовать одна, две и даже три зоны. Наличие и протяженность их можно регулировать, изменяя условия теплопередачи — температуру и расход поступающей воды, температуру испарения, зазор между резцом и втулкой, частоту вращения резцов и т. д.

Используя приведенные выше формулы теплопередачи, для любого типа льдогенератора можно рекомендовать необходимый режим рациональной эксплуатации.

Затруднения могут возникнуть тогда, когда процесс льдообразования нельзя приравнять к варианту использования плоской или цилиндрической стенки например при замораживании воды в льдоформах.

В этом случае для определения продолжительности замораживания воды (в ч) используют одну из приближенных формул Р.П. Планка $\tau = Ab(b + \sqrt{b}) / t_2$,

где b — меньшая сторона льдоформы в ее верхней части; A и B — коэффициенты, определяемые по соотношению сторон поперечного сечения формы (табл. XV.1).

Таблица XV.1

Коэффициент	Соотношение сторон				
	1	1,5	2	2,5	4
A	3120	4060	4540	4830	5320
B	0,036	0,030	0,026	0,024	0,023

Льдогенераторы

Льдогенератором называют теплообменный аппарат для замораживания воды либо рассола с устройствами для подачи воды, отделения и выдачи (либо без нее) льда, связанный через регулирующую автоматику с холодильным компрессорно-конденсаторным агрегатом.

Льдогенераторы могут быть классифицированы как по видам, составу и назначению вырабатываемого льда, так и по способам и источникам охлаждения и по конструктивным особенностям. Льдогенераторы бывают периодического и непрерывного действия, с оттаиванием и механическим отделением льда. Кроме того, различают неавтономные льдогенераторы — с централизованным охлаждением рассолами и непосредственно хладагентами; автономные (в частности, агрегатные) автоматизированные льдогенераторы непосредственного охлаждения с компрессорными, абсорбционными, водяными парожеткорными и термоэлектрическими холодильными машинами (в них используется механическая, тепловая, электрическая энергия).

Льдогенераторы с автоматизированным и ручным управлением по своей конструкции могут быть: 1) с подвижными и стационарными льдоформами; 2) панельные погружные и оросительные, в частности пакетопанельные; 3) трубчатые погружные и оросительные с наружным и внутренним намораживанием льда, в частности кожухотрубные; 4) роторные непрерывного действия — скребкового, шнекового и фрезерного типов; 5) с плунжерным и гидравлическим отрывом льда от поверхностей льдообразования.

Ледяные холодоаккумуляторы (автономные и неавтономные) могут быть без отделения льда, с отделением льда (фригаторные), а также зероторного типа.

По производительности льдогенераторы подразделяют на большие — производительностью 1000 кг/ч и более, средние — менее 1000, но более 100 кг/ч, малые — менее 100, но более 10 кг/ч и мелкие — менее 10 кг/ч, в том числе льдогенераторы со встроенными льдохранилищами и мини-льдогенераторы (производительностью 1 кг/ч), которые обычно входят в состав домашних холодильников.

По способу охлаждения аппараты для производства льда подразделяют на две группы: льдогенераторы рассольного охлаждения и льдогенераторы непосредственного охлаждения.

Льдогенераторы рассольного охлаждения

Льдогенераторы блочного льда. Наиболее распространенным типом льдогенераторов рассольного охлаждения является так называемый льдогенератор блочного льда. Этот тип льдогенератора представляет собой бак, заполненный рассолом с температурой около -10°C . Рассол охлаждается в испарителе, установленном в баке вдоль его продольной стенки. Испаритель льдогенератора состоит из вертикально трубной секции. От основной части бака он отделен промежуточной стенкой, образующей карман, в который поступает отепленный льдоформами рассол, циркулирующий с помощью мешалок.

Для лучшей циркуляции рассола мешалки размещены в горловинах до-

дополнительной торцевой стенки, образующей поперечный карман. Таким образом, вначале рассол циркулирует в баке и охлаждает льдоформы, а затем поступает в карман испарителя, где он охлаждается, и затем снова возвращается в основную часть бака для охлаждения льдоформ.

Льдоформы сконфигурованы в секции, состоящие из 10—20 форм, которые заполняют из специального наполнительного устройства (дозатора) водой, а затем опускают в рассол. По мере охлаждения воды в формах намораживается лед. При этом секции периодически перемещают с помощью толкающего механизма с таким расчетом, чтобы в конце бака процесс намораживания льда в формах был закончен.

Далее секцию льдоформ с помощью подъемного механизма вынимают из рассола и опускают в оттаивательный бачок, в который предварительно заливают воду с температурой около 40°C. После пребывания льдоформ в теплой воде в течение 1,5—2 мин блоки льда легко отделяются и с помощью опрокидывающего устройства направляются в льдохранилище. Для ускорения процесса льдообразования применяют предварительное охлаждение воды в специальных водоохладителях либо не домораживают блок, так как замораживание его сердцевины протекает наиболее медленно.

Основными недостатками льдогенераторов блочного льда являются большая продолжительность процесса замораживания воды в льдоформах; повышенный (на 5°C) перепад температур замораживаемого блока льда и хладагента; повышенный расход электроэнергии, связанный с подогревом воды для оттаивания льдоформ и дополнительным перепадом температур в аппарате; наличие потерь льда при оттаивании льдоформ; сложность механизации трудоемких процессов.

Чтобы показать преимущества применения льдогенераторов непосредственного охлаждения рассмотрим физическую сущность процесса.

Как известно, скорость отнятия теплоты от воды (в льдоформе) зависит от площади поверхности теплопередачи F , разности температур между водой и хладагентом (или рассолом) Δt и значения коэффициента теплопередачи k , т. е. $Q = F \Delta t k$.

Обычно рассол имеет температуру -7°C (температура кипения хладагента -12°C). Разность температур между водой и рассолом составляет 7°C , а при непосредственном охлаждении разность температур Δt увеличивается до 12°C , поэтому отвод теплоты в единицу времени при непосредственном охлаждении будет на 70% больше, чем при рассольном. Значение коэффициента теплопередачи при непосредственном охлаждении составляет $889 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ вместо $430 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ при рассольном. Если подставить значения Δt и k в формулу, определяющую значение Q , а затем разделить Q на F , то можно получить количество теплоты, отнятой от 1 м^2 поверхности в единицу времени. При рассольном охлаждении $Q/F = 7 \times 430 = 3010 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, а при непосредственном $Q/F = 12 \times 889 = 10\,668 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. При этом время замораживания блока уменьшается втрое.

Льдогенератор чешуйчатого льда. Барабан льдогенератора (рис. XV.5) выполнен из тонких листов монель-металла. На внутреннюю полость барабана поступает холодный рассол, а отепленный удаляется. Снаружи барабан омывается водой, которая охлаждается, замерзает и в месте установки деформирующего ролика отделяется в виде чешуек льда. Барабан вращается медленно. За один оборот его намораживается слой льда толщиной около 3 мм. При диаметре барабана 2,3 мм и длине 4,1 м производительность льдогенератора достигает 10 т/сут.

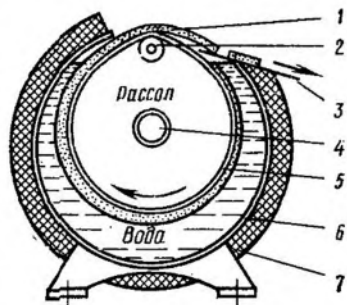


Рис. XV.5. Льдогенератор чешуйчатого льда:

1 — лед; 2 — деформирующий ролик; 3 — лодоскат в бункере; 4 — вал с подачей рассола; 5 — вращающийся цилиндр; 6 — кожух льдогенератора; 7 — изоляция.

Льдогенераторы непосредственного охлаждения

Применение льдогенераторов непосредственного охлаждения более перспективно, чем льдогенераторов с рассольным охлаждением.

Льдогенераторы чешуйчатого льда. На мясокомбинатах применяют льдогенераторы чешуйчатого льда конструкции УкрНИИХИ. В стальном барабане, частично погруженном в воду, через полый вал циркулирует аммиак. На наружной поверхности барабана намораживается лед, который отделяется с помощью плотно прилегающего стального ножа и поступает в бункер льда. Производительность льдогенератора при диаметре барабана 700 мм, длине 900 мм и частоте вращения 0,133 1/с составляет 200—300 кг/ч. Существенным недостатком льдогенератора является замедленное намораживание льда; только нижняя часть барабана омывается кипящим аммиаком и водой, большая же верхняя часть его внутри охлаждается парами аммиака, снаружи на ее поверхности происходит переохлаждение льда.

Льдогенераторы снежного льда. Льдогенераторы снежного льда (рис. XV.6) широко распространены в народном хозяйстве. Цилиндр и чугунная рифленая втулка его образуют рубашку, в которой кипит аммиак, поступающий из отделителя жидкости. Внутри втулки вращается вал с лопатками и насаженными на них резами, прилегающими к внутренней ее поверхности. Во втулку циркуляционным насосом подается вода, которая захватывается лопатками, омывает втулку, охлаждается, замораживается и срезается резами. Смесь воды и снежного льда выносится из льдогенератора на сетку бака сборника холодной воды или в приемник брикет-пресса. В первом случае на сетке остается снежный лед, а вода циркуляционным насосом возвращается в льдогенератор.

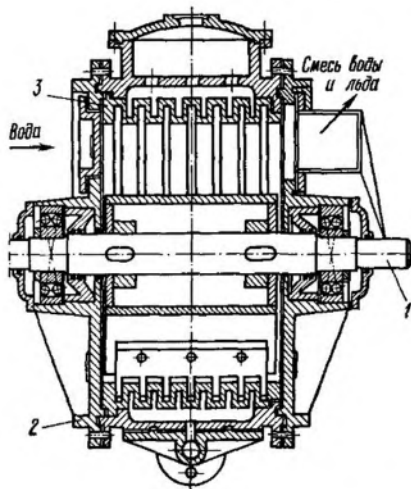
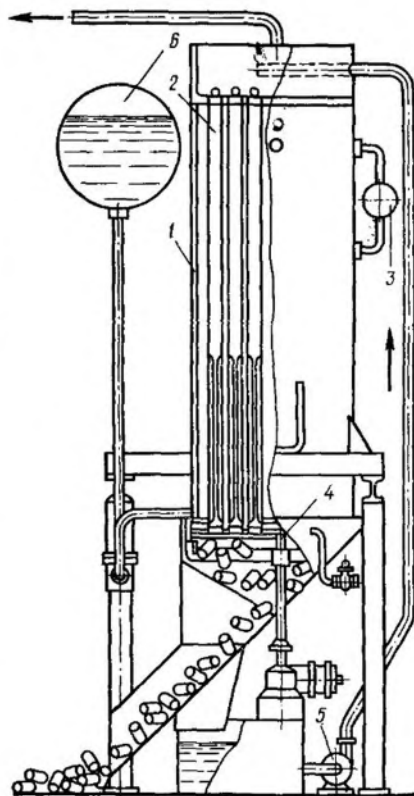


Рис. XV.6. Льдогенератор снежного льда:

1 — вал; 2 — цилиндр; 3 — втулка.

Рис. XV.7. Льдогенератор трубчатого льда:

1 — кожух льдогенератора; 2 — труба льдогенератора; 3 — поплавковый регулирующий вентиль; 4 — механический нож; 5 — центробежный насос для подачи воды; 6 — сборник аммиака.



Во втором случае в брикет-прессе образуется чечевицеобразный лед, который поступает в бункер, а вода возвращается в льдогенератор на повторное охлаждение.

В обоих случаях в сборник холодной воды с помощью поплавкового вентиля подается свежая вода. Льдогенератор снежного льда с длиной цилиндра 1,5 м и диаметром 0,8 м имеет производительность около 25 т/сут.

Автоматизированные льдогенераторы снежного льда с брикет-прессом и бункером льда, расположенные над железнодорожной платформой или причалом рыболовных судов, позволяют удобно подавать лед в карманы вагонов-ледников или в трюмы для пересылки рыбы льдом. В последнем случае лед иногда изготавливают из морской воды.

В настоящее время выпускаются льдогенераторы снежного льда с вертикальным расположением цилиндра, охлаждаемого R12, производительность такого льдогенератора 100 кг/ч, диаметр цилиндра 416 мм, высота 625 мм.

Льдогенераторы трубчатого льда. По конструкции льдогенераторы трубчатого льда (рис. XV.7) напоминают вертикальные кожухотрубные конденсаторы. Пространство между кожухом и трубками заполняют кипящим аммиаком. Вода, стекая по внутренней поверхности трубок, охлаждается, и лед намораживается в виде трубок. Когда толщина их достигает 10—15 мм, процесс охлаждения прекращается. После этого вентиль отсоса паров из льдогенератора перекрывают, а жидкий аммиак перекачивают с помощью горячих паров в специальный сборник. В следующем цикле аммиак самотеком возвращается обратно в кожух льдогенератора. Этими же парами производится оттаивание льда у трубчатой поверхности. Лед после этого опускается вниз и срезается ножом, расположенным заподлицо с нижней трубной доской льдогенератора, и попадает в бункер. При трубках диаметром 57 × 3,5 мм время одного цикла (при продолжительности процесса оттаивания около 10 мин) составляет примерно 40 мин. Льдогенератор вырабатывает трубки льда заданной высоты и толщины. Льдогенератор полностью автоматизирован и при производительности 10 т/сут имеет следующие габаритные размеры: высоту 3,9 м, длину 2,9 м, ширину 1,9 м.

Для уменьшения потерь при оттаивании льда трубки льдогенератора делают прямыми, с гладкой внутренней поверхностью. При оттаивании следует обеспечить интенсивный обогрев нижней трубной доски, иначе удаление льда будет затруднено.

В последние годы получили распространение льдогенераторы непосредственного охлаждения, представляющие собой льдоформы с рубашкой, в которой кипит аммиак. В формы вставляют вертикально расположенные по всей высоте одну или несколько трубок, которые охлаждаются кипящим аммиаком. В результате на внутренней поверхности льдоформ и наружной поверхности опущенных в них вертикальных трубок происходит одновременное намораживание льда.

Вследствие этого процесс льдообразования ускоряется в несколько раз по сравнению с намораживанием льда в формах тех же размеров рассольных льдогенераторов.

Генератор блочного льда с пленочным намораживанием. Генератор непрерывного производства блочного льда пленочного намораживания представляет собой льдоформу, имеющую рубашку, в которой кипит аммиак. Нижняя часть формы имеет вид четырехгранной пирамиды, в вершуг которой имеется отверстие с толкателем. При ходе толкателя лед отрывается от стенок формы. В образовавшийся зазор между льдом и стенкой формы поступает вода, которая быстро замерзает, после чего следует новое выталкивание. В результате из формы выходит сплошной ледяной блок квадратного сечения. Производительность такого льдогенератора высока, так как основное тепловое сопротивление весьма мало. Механический способ выталкивания льда можно заменить гидравлическим. В этом случае лед выталкивается непосредственно водой, подаваемой в форму, что позволяет отказаться от движущихся частей и значительно упростить конструкцию льдогенератора. Преимуществами такого аппарата являются отсутствие системы оттаивания льда и большая компактность аппарата.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Сухой лед, или твердая углекислота (CO_2), при атмосферном давлении сублимирует, т. е. переходит в газообразное состояние, минуя жидкую фазу. Благодаря этому свойству твердая углекислота получила название сухого льда. Удельная масса его зависит от способа получения и составляет 1,3—1,6 кг/дм³. При давлении 98 кПа температура сухого льда равна $-78,9^\circ\text{C}$, а теплота, необходимая для полного его испарения (скрытая теплота сублимации), — 561 кДж/кг.

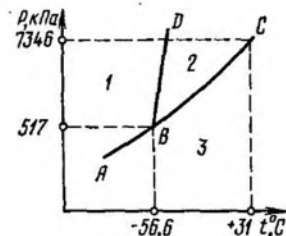


Рис. XVI.1. Диаграмма $p-t$ для углекислоты:

1 — область твердой фазы углекислоты; 2 — область жидкой фазы; 3 — область газовой фазы.

Как хладоноситель или охлаждающее средство сухой лед значительно эффективнее водного. Полная холодопроизводительность 1 кг сухого льда с учетом использования холода паров, которые образуются при сублимации и отеплении их до 0°C , составляет 665 кДж/кг, что в 1,9 раза выше холодопроизводительности 1 кг водного льда. В смеси сухого льда с эфиром можно получить температуру -100°C , а при создании вакуума — значительно ниже.

Диаграмма фазовых состояний углекислоты приведена на рис. XVI.1. Участок 1 диаграммы является областью твердой фазы, участок 2 — областью жидкости, участок 3 — газовой областью (перегретого пара). Пограничные линии между этими агрегатными состояниями представляют собой совокупность точек, в которых могут находиться в термодинамическом равновесии какие-либо две фазы: твердое тело и пар (кривая AB), жидкость и пар (кривая BC) или жидкость и твердое тело (кривая BD).

Кривая AB характеризует давление насыщенных паров твердой углекислоты. Из диаграммы видно, что при давлениях ниже 517 кПа (или температурах ниже $-56,6^\circ\text{C}$) углекислота может находиться лишь в твердой и газообразной фазах. Следовательно, только при этих давлениях возможна сублимация твердой углекислоты. Температура сублимации является функцией давления.

Кривая BC характеризует давление насыщенных паров жидкой углекислоты (сверху эта кривая ограничена критической точкой C с параметрами $p_{кр} = 7346$ кПа и $t_{кр} = 31^\circ\text{C}$), кривая BD — плавление (затверждение) углекислоты. В отличие от аналогичной кривой для водного льда кривая BD имеет положительный наклон к оси абсцисс.

В точке B пересекаются три кривые равновесных состояний углекислоты. Эта точка характеризует такое состояние углекислоты, при котором в термодинамическом равновесии находятся одновременно три фазы. Параметрами этой точки, называемой тройной точкой, являются давление $p = 517$ кПа и температура $t = -56,6^\circ\text{C}$.

При давлениях выше 702 кПа и подводе теплоты твердая углекислота, как и водный лед, последовательно переходит в жидкую, а из жидкой — в газообразную фазу. При давлениях ниже 517 кПа жидкой фазы углекислоты не существует.

Сведения о термодинамических свойствах углекислоты, таких, как i и s , содержатся в $i-p$ и $T-s$ диаграммах. Однако эти диаграммы не позволяют судить о количественном соотношении фаз в тройной точке, а следовательно, не дают возможности определить энтальпию или энтропию трехфазной смеси. В этом случае требуются дополнительные расчеты. Так, для определения энтальпии трехфазной смеси пользуются уравнениями

$$i'x = i''y + i'''z = i,$$

$$x + y + z = 1,$$

где i' , i'' , i''' — энтальпии соответственно жидкой, газообразной и твердой фаз; x , y , z — массовые доли этих фаз.

Холодопроизводительность 1 кг углекислоты равна разности энтальпий парообразной углекислоты, имеющей давление и температуру охлаждаемой среды, и твердой углекислоты. Теплота плавления (или замерзания) углекислоты в тройной точке равна разности энтальпий жидкой и твердой углекислоты при давлении 517 кПа. Значение теплоты плавления в тройной точке составляет 195,7 кДж/кг. При давлениях выше 517 кПа и температурах выше $-56,6^\circ\text{C}$ теплота плавления практически мало отличается от теплоты плавления в тройной точке.

Удельную теплоемкость твердой углекислоты [в кДж/(кг·К)] в диапазоне температур от 57°C до -110°C определяют по уравнению $c = 1,67 - 0,0118 \times \times T - 0,0000523 T^2$.

Теплопроводность ее при $\rho = 1,4 \text{ кг/дм}^3$ составляет около 0,384 Вт/(м·К).

Сухой лед получают в результате отвода теплоты от жидкой углекислоты.

Цехи, вырабатывающие углекислоту, расположены в основном в европейской части СССР. Самый крупный производитель углекислоты Центральный экономический район (40% сухого льда и 18% сжиженной углекислоты без учета производства на внутризаводские нужды).

По исходному сырью, используемому для выработки сухого льда и сжиженной углекислоты, цехи подразделяются на 2 группы: группу А, работающую на базе использования бросовых газов химикатов, нефтеперерабатывающих, мыловаренных, гидролизных и спиртовых заводов; и группу Б, работающую на базе специального сжигания топлива (в том числе, при известковообжигательных печах, при домнах, при ТЭЦ).

Лучшим сырьем для заводов сухого льда является углекислота спиртового брожения (почти 100%-ный углекислый газ). За ней идут экспансерные газы заводов синтетического аммиака (до 88% углекислоты), углекислота метанового брожения и дымовые газы известковообжигательных печей. Последнее место по качеству исходного сырья и первое по его количеству занимает углекислота дымовых газов (10—16% углекислоты). Однако большинство заводов в СССР применяют именно этот вид сырья. Это объясняется тем, что указанные заводы строили в основном при предприятиях, которые являются главными потребителями сухого льда (например, при хладокомбинатах, имеющих цехи мороженого).

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА ЖИДКОЙ УГЛЕКИСЛОТЫ

Углекислота из дымовых газов топлива. Дымовые газы подвергают предварительной обработке: охлаждению до необходимой температуры и очистке от механических и химических примесей. Охлаждение дымовых газов с одновременной отмывкой их от механических примесей и частичной очисткой от сернистых соединений производится в холодном скруббере 1 (рис. XVI.2), насадка которого орошается холодной водой. В случае, если запыленность дымовых газов превышает 5 г/м^3 , целесообразно устанавливать специальные пылеулавливающие аппараты (например, центробежный скруббер).

Для улавливания капельной влаги, выносимой дымовым газом из холодного скруббера, на выходе из аппарата установлен водоотделитель 2. Просос дымовых газов через холодный скруббер и создание напора, необходимого для преодоления сопротивлений трубопроводов и аппаратов технологической схемы, обеспечиваются эксгаустером 3.

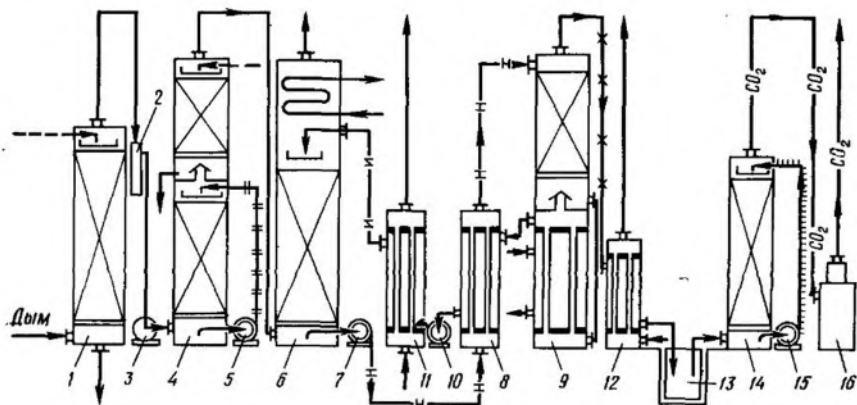
Далее дымовые газы направляются в содовый скруббер 4, нижняя насадка которого орошается раствором соды с помощью насоса 5 и предназначена для химической очистки газов от сернистых соединений; верхняя насадка орошается тепловой водой и служит для нагрева газов до температуры процесса абсорбции. Охлажденные и отмытые дымовые газы поступают в нижнюю часть абсорбера 6.

Процесс абсорбции углекислоты из дымовых газов идет на разветвленной поверхности насадки, орошаемой сверху раствором моноэтаноламина.

В верхней части абсорбера установлен трубчатый водяной холодильник, поддерживающий равенство температур дымовых газов на входе в абсорбер

и на выходе из него. Насыщенный углекислотой раствор моноэтаноламина собирается в нижней части абсорбера, откуда насосом насыщенного раствора 7 через теплообменник раствора 8 направляется на орошение насадки дефлегматора-десорбера 9.

В теплообменнике раствора рекуперируется тепло истощенного раствора моноэтаноламина, отводимого из десорбера.



- | | |
|--------------------------|---------------------------|
| — Дымообразные газы | --- Вода |
| — Насыщенный раствор МЭА | ----- Раствор $KMnO_4$ |
| — Истощенный раствор МЭА | — Парогазовая смесь |
| — Раствор соды | — CO_2 — Углекислый газ |

Рис. XVI.2. Схема установки для получения углекислоты из дымовых газов: 1 — холодный скруббер; 2 — водоотделитель; 3 — эксгаузер; 4 — содовый скруббер; 5 — насос; 6 — абсорбер; 7 — насос насыщенного раствора; 8 — теплообменник; 9 — дефлегматор-десорбер; 10 — насос истощенного раствора; 11 — холодильник раствора; 12 — холодильник газа; 13 — сборник конденсата; 14 — промывная колонка; 15 — насос; 16 — центробежный водоотделитель.

Стекая по насадке дефлегматора, насыщенный раствор контактирует с идущей противотоком более горячей парогазовой смесью, в результате чего между ними происходит тепло- и массообмен. Пройдя дефлегматор, раствор по внешнему трубопроводу перетекает в трубное пространство кипятильника, где кипит за счет теплоты конденсации водяного пара, подаваемого в межтрубное пространство.

Получаемая при кипении раствора парогазовая смесь поступает в дефлегматор, а истощенный раствор моноэтаноламина отводится в теплообменник раствора, откуда насосом истощенного раствора 10 через холодильник раствора 11 направляется на орошение насадки абсорбера. Таким образом, абсорбционно-десорбционный цикл замыкается.

Выходящая из верхней части дефлегматора парогазовая смесь, состоящая из газообразной углекислоты, паров воды и моноэтаноламина, поступает в межтрубное пространство холодильника газа 12, где водяные пары конденсируются, а углекислый газ охлаждается.

Конденсат отделяется в сборнике конденсата 13 и возвращается в абсорбционно-десорбционный цикл, а углекислый газ направляется в промывную колонку 14, насадка которой орошается раствором $KMgO_4$. Рециркуляция раствора осуществляется насосом 15. Отмывка углекислого газа марганцовокислым калием необходима для удаления следов и запаха моноэтаноламина. На выходе углекислого газа из колонки установлен центробежный водоотделитель 16, предназначенный для полного отделения капельной влаги.

Если исходное сырье не содержит сернистых соединений, из схемы ис-

ключают содовый скруббер. В этом случае газы в холодном скруббере охлаждаются до температуры, равной температуре процесса абсорбции.

Углекислота спиртового брожения. Побочным продуктом спиртовых, пивоваренных и некоторых других заводов является почти чистый углекислый газ, получаемый при брожении сахара. Теоретически при брожении 1 кг сахара образуются 0,511 кг спирта и 0,489 кг углекислого газа. Практически из-за неполноты процесса брожения, а также из-за побочных реакций выход спирта и углекислого газа оказывается ниже. В период главного брожения, когда в чане не остается воздуха, углекислота под небольшим избыточным давлением направляется в газгольдер, а из него — на дальнейшую переработку. Для удаления из углекислого газа примесей применяют физико-химические или химические методы обработки углекислоты брожения. Схема производства жидкой углекислоты из продуктов спиртового брожения и методика расчета описаны в специальной литературе.

Углекислота синтеза аммиака. В значительном количестве углекислый газ получается на заводах синтетического аммиака (до 2,5 т на 1 т аммиака) в результате обработки воздушно-водяного генераторного газа водой в присутствии катализатора.

Для удаления углекислоты из газовой смеси ее промывают водой в специальных башнях, работающих под давлением 1666—1862 кПа. Затем вода, насыщенная углекислотой и другими газами, направляется в гидротурбину, где при расширении до атмосферного давления из воды выделяются растворенные в ней газы. Эти так называемые экспанзерные газы содержат 85—88% CO_2 (по объему), 15—12% $\text{N}_2 + \text{CO}$ и некоторое количество сероводорода (2—4 г/м³).

Технологическая схема получения углекислоты состоит из устройства для очистки газа от сероводорода с помощью окислов железа и компрессорной установки. После сжатия смесь направляется в конденсатор, где углекислота ожигается, а неконденсирующиеся газы (H_2 , CO) выпускаются в атмосферу с рекуперацией холода, полученного в результате дросселирования. Полученную жидкую углекислоту используют для производства сухого льда в баллонах.

Углекислота из «защитных» газов. На многих металлургических и машиностроительных заводах находятся станции производства азотного «защитного» газа (96—97% N_2 , 1,5—2% H_2 , 1,5—2% CO), необходимого для термообработки металла. В процессе его получения выбрасывается в атмосферу значительное количество углекислоты (до 20—25 т/сут). Поэтому при таких заводах организуется производство сжиженной или твердой углекислоты.

Технологическая схема принципиально не отличается от типовой каскадной схемы производства сжиженной углекислоты при среднем давлении.

Углекислота из газов известковообжигательных печей. Содержание углекислого газа в газах, отходящих из известковообжигательных печей, зависит от технологического процесса обжига извести. При использовании таких газов улучшаются технико-экономические показатели углекислотных установок по сравнению с установками, использующими в качестве сырья дымовые газы.

Технологические схемы получения углекислого газа из газов, отходящих от известковообжигательных печей, в общем случае аналогичны схемам, применяемым при использовании дымовых газов.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА СУХОГО ЛЬДА

Отвод теплоты от жидкой углекислоты может производиться одним из следующих двух способов:

внешний отвод теплоты — отвод теплоты от находящейся под давлением жидкой углекислоты через стенку сосуда при температуре ниже температуры тройной точки; конденсация газообразной углекислоты осуществляется непосредственно из газовой смеси, содержащей углекислый газ, с последующим отводом теплоты при температуре ниже температуры тройной точки;

внутренний отвод теплоты — испарение жидкой углекислоты с отводом паров от поверхности; дросселирование жидкой углекислоты до давления тройной точки с последующим прессованием полученного снега; расширение жидкой углекислоты с получением внешней работы; испарение жидкой углекислоты

при давлении 686—882 кПа с частичной сублимацией уже образовавшейся твердой углекислоты и отводом пара через ее поры.

Практическое применение получил способ, основанный на внутреннем отводе теплоты при дросселировании жидкой углекислоты с последующим прессованием снега в специальных суходельных прессах или отводом образующихся паров через поры блока сухого льда в льдогенераторах.

Снижение давления жидкой углекислоты от давления конденсации до давления тройной точки может происходить как при однократном дросселировании (простой цикл), так и при многократном (цикл с промежуточным отводом пара). При этом давление конденсации может принимать следующие значения: 6370—6860 кПа (цикл высокого давления), 1568—1960 кПа (цикл среднего давления), 736—882 кПа (цикл низкого давления).

Технологические схемы производства сухого льда основаны преимущественно на применении цикла высокого давления с промежуточным отводом пара.

Схемы с циклом среднего давления и промежуточным отводом пара, термодинамически более выгодные, пока имеют очень ограниченное применение, поскольку трудно подобрать углекислотные и аммиачные компрессоры с необходимыми характеристиками.

Схемы с простым циклом низкого давления требуют применения низкотемпературных двухступенчатых холодильных машин, усложняющих условия эксплуатации, что делает их использование в настоящее время нецелесообразным.

Блоки сухого льда получают либо в суходельных прессах, либо в льдогенераторах вне зависимости от принятой технологической схемы.

Схема производства сухого льда с циклом высокого давления. Углекислый газ и отсасываемые из льдогенераторов пары (нижний отсос) поступают к всасывающей стороне углекислотного компрессора 1 (рис. XVI.3). Отвод теплоты сжатия и отделение капельной влаги производятся в холодильниках 2 и маслолагоотделителях 3, которые одновременно выполняют роль смесителей газа, нагнетаемого ступенями компрессора и отсасываемых паров, обеспечивая отделение капельной влаги, образующейся при смешении холодного и теплого потоков газов.

Сжатый газ проходит блок очистки и осушки 4 и поступает в конденсатор 5. Жидкая углекислота, пройдя стальные баллоны 6, которые служат промежуточной емкостью высокого давления, дросселируются до давления 2452—2744 кПа. Полученные при дросселировании пары отсасываются третьей ступенью компрессоров, а жидкость накапливается в первом промежуточном сосуде 7, откуда дросселируется до давления 736—980 кПа во второй промежуточный сосуд 8. Пары отсасываются второй ступенью компрессора, а жидкая углекислота из сосуда направляется в льдогенераторы 9 (на схеме условно показан один льдогенератор), которые работают поочередно.

Льдогенераторы заполняются жидкой углекислотой самотеком при открытом вентиле уравнивательной линии (верхний отсос) и закрытых диафрагмах (нижний отсос). После заполнения открывают одну из диафрагм нижнего отсоса, что обеспечивает дросселирование жидкости до давления всасывания.

При давлении тройной точки жидкость превращается в сухой лед. Процесс льдообразования распространяется в полости льдогенератора снизу вверх концентрическими поверхностями, причем роль дросселя выполняет масса сухого льда. Окончание процесса льдообразования характеризуется падением давления внутри льдогенератора до давления всасывания первой ступени компрессора.

Схема производства сухого льда методом прессования с циклом высокого давления. Снег, получаемый при дросселировании жидкой углекислоты до давления ниже давления тройной точки, превращается в блоки сухого льда в результате его сжатия (прессования). Удельная масса сухого льда зависит от давления и продолжительности сжатия, а также от формы блока и практически составляет 1,4—1,6 кг/дм³. При получении сухого льда методом прессования в специальных суходельных прессах давление сжатия снеговой массы больше, чем в льдогенераторах. Углекислый газ и отсасываемые из пресса пары (нижний отсос) поступают к всасывающей стороне основного компрессора, которым они сжимаются до давления конденсации. Схема сжижения

сжимаемого основным компрессором газа аналогична схеме, представленной на рис. XVI.3.

Жидкая углекислота поступает к стальным баллонам, откуда, пройдя теплообменники, предназначенные для рекуперации холода отсасываемых из второго промежуточного сосуда и сухоледного пресса паров, дросселируется до давления 2450—2940 кПа в первый промежуточный сосуд.

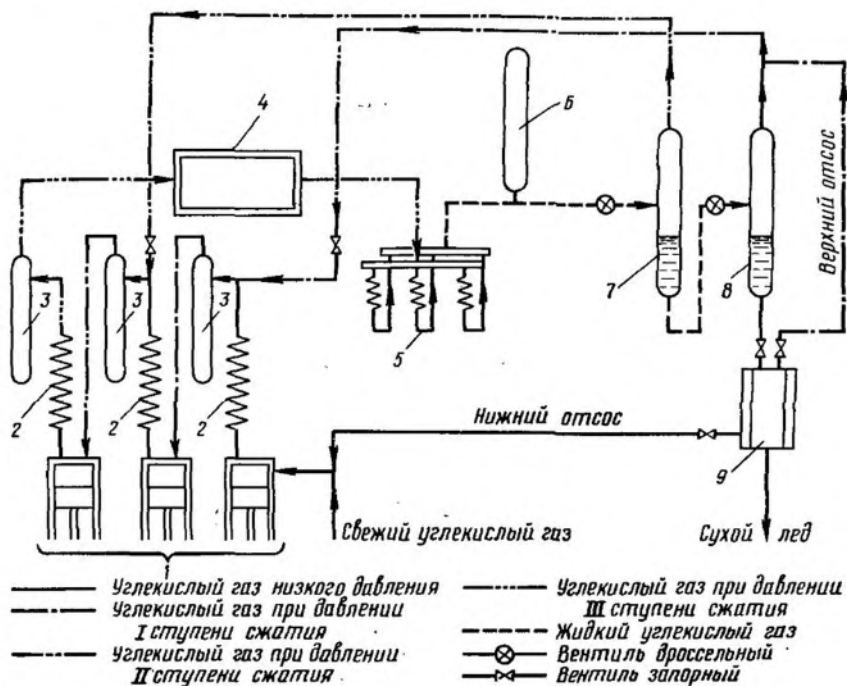


Рис. XVI.3. Схема производства сухого льда с циклом высокого давления с промежуточным отбором пара:

1 — углекислотные компрессоры; 2 — холодильники; 3 — маслоаглоотделители; 4 — блок очистки и осушки; 5 — конденсаторы; 6 — стальной баллон; 7 — первый промежуточный сосуд; 8 — второй промежуточный сосуд; 9 — льдогенераторы.

Полученные при дросселировании пары отсасываются третьей ступенью дополнительного компрессора, а жидкая углекислота дросселируется до давления 980—1470 кПа во второй промежуточный сосуд. Образовавшиеся при дросселировании пары через теплообменник отсасываются второй ступенью дополнительного компрессора, а жидкая углекислота, пройдя мерный бачок, обеспечивающий заполнение пресса необходимым количеством жидкости, дросселируется в снеговые камеры сухоледного пресса до давления, равного давлению тройной точки, 517 кПа.

Полученные при дросселировании пары отсасываются через теплообменник первой ступенью дополнительного компрессора (верхний отсос).

Процесс наполнения снеговой камеры продолжается около 6 мин, после чего регулирующий вентиль закрывается, а продолжающий действовать верхний отсос доводит давление в камере до 392—440 кПа. После этого верхний отсос отключают и включают нижний, обеспечивающий снижение давления в камере до 147—157 кПа. По достижении указанного давления накопленный в камере пресса углекислотный снег сжимается, в результате чего получается

компактный блок сухого льда с удельной массой до $1,6 \text{ кг/дм}^3$. После удаления блока из камеры прессующий поршень поднимается вверх, а отверстие камеры закрывается головкой плунжера нижнего цилиндра.

Во время работы нижнего отсоса, обеспечивающего снижение давления, и освобождения от блока одной камеры в другой камере накапливается углекислотный снег.

Дополнительный компрессор сжимает пары до давления конденсации. Отход теплоты сжатия и отделение капельной влаги производится в холодильниках дополнительного компрессора и маслоотделителях, одновременно выполняющих роль смесителей. Сжатый газ проходит блок очистки, предназна-

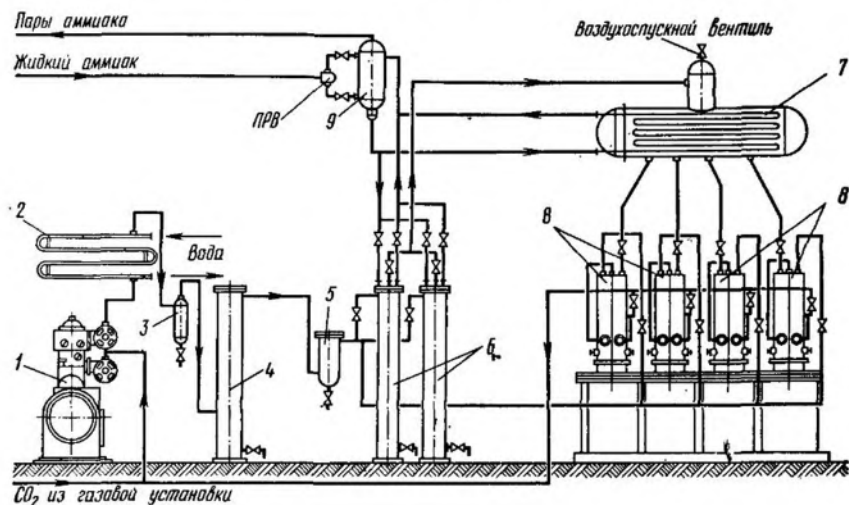


Рис. XVI.4. Схема производства сухого льда при низком давлении:

1 — компрессор; 2 — водяной холодильник; 3 — маслоотделитель; 4 — колонка с хлористым кальцием; 5 — силикагелевый фильтр; 6 — вымораживатель влаги; 7 — конденсатор-испаритель; 8 — льдогенераторы; 9 — отделитель жидкого аммиака.

ченный для очистки газа от масла (сжимаемый в дополнительном компрессоре газ влаги не содержит), и поступает в конденсатор. Полученная жидкая углекислота соединяется с потоком жидкости, идущим из конденсатора основного компрессора.

Схема производства сухого льда с циклом низкого давления. Газ сжимается в одноступенчатом компрессоре 1 (рис. XVI.4) до давления $882\text{—}980 \text{ кПа}$, направляется в водяной холодильник 2, маслоотделитель 3, колонку с хлористым кальцием 4, силикагелевый фильтр 5 и вымораживатель влаги 6. В конденсаторе-испарителе 7 газ сжижается и затем направляется в льдогенераторы для получения блоков сухого льда. Из льдогенераторов газ поступает в компрессор 1.

Холод, необходимый для вымораживания влаги из углекислого газа и сжижения его, получают от компрессионной или абсорбционной холодильной установки. Для конденсации углекислоты при давлениях $882\text{—}980 \text{ кПа}$ температура кипения хладагента в конденсаторе-испарителе должна составлять $-48 \div -45 \text{ }^\circ\text{C}$.

Дальнейшее снижение давления конденсации углекислоты может быть достигнуто при использовании холода, генерируемого при более низких температурах, например в холодильных установках с трехступенчатым сжатием хладагента или в каскадных холодильных машинах с циркуляцией различных хладагентов.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Холодильный транспорт является важным звеном в общей холодильной цепи. Он обеспечивает хранение и доставку скоропортящихся пищевых продуктов от места их производства до мест потребления. Холодильный транспорт подразделяется на водный, железнодорожный и автомобильный. К холодильному транспорту можно также отнести и рефрижераторные контейнеры.

Холодильные установки этих транспортных средств должны быть компактными, поддерживать заданные температурно-влажностные режимы в охлаждаемых помещениях, такие же, как и на стационарных холодильниках.

В холодильных установках транспортных средств применяют высокоэффективные изоляционные материалы. При эксплуатации холодильных установок предъявляют повышенные требования к безопасности обслуживающего персонала и к сохранности перевозимого груза.

ВОДНЫЙ ХОЛОДИЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ

Основные типы рефрижераторных судов. Рефрижераторные суда классифицируют по ряду характерных признаков.

По эксплуатационному назначению суда разделяют по следующим видам: транспортные рефрижераторные суда морского и речного флота, предназначенные для внутренних и внешнеторговых перевозок скоропортящихся грузов; рыбопромысловые рефрижераторные суда; специализированные рефрижераторные суда (суда-контейнеровозы, суда для перевозки сжиженных газов).

По району плавания различают суда ограниченного и неограниченного района плавания. Последняя категория судов характеризуется автономностью плавания, в большинстве случаев от 60 до 120 суток без пополнения всех запасов (топлива, продовольствия и т. д.).

По ассортименту перевозимых грузов рефрижераторные суда могут быть специализированными (для перевозки определенных видов грузов) и универсальными (для перевозки широкого ассортимента грузов).

По температурному режиму в трюмах различают рефрижераторные суда низкотемпературные и высокотемпературные. Первые предназначены для перевозки охлажденных грузов (охлажденное мясо, малосоленая рыба, яйца, фрукты, овощи), вторые — для перевозки мороженых грузов, а промысловые суда — и для замораживания рыбы.

На современных крупных рефрижераторных судах грузоемкость трюмов достигает 3000—3500 м³ (на рыболовно-морозильных), 8000—9000 м³ (производственных и производственно-транспортных), 20 000—23 000 м³ (на плавучих базах и транспортных рефрижераторах). Температура воздуха в трюмах в зависимости от режимов изменяется от —15 до —30 °С при температурах кипения от —25 до —40 °С.

Большое развитие в Советском Союзе получили рыбопромысловые рефрижераторные суда. Они сочетают в себе функции мощного добывающего судна и плавучего рыбоперерабатывающего предприятия, действующего непосредственно в районах океанического промысла; такие суда оснащены самым современным поисковым, промысловым, технологическим и холодильным оборудованием. Уровень хладофикации на флоте рыбной промышленности к 1980 г. приблизился к 85%.

Рыбопромысловые рефрижераторные суда подразделяются на добывающие (супертраулеры, большие, средние и малые морозильные траулеры, тунцеловные суда), обрабатывающие (рыбопромысловые и тунцеловные базы, рыбообрабатывающие базы и производственные рефрижераторы) и приемно-транспортные.

Добывающие суда предназначены для лова рыбы, замораживания улова, выработки свежеехлажденной продукции, филе, рыбной муки, изготовления консервов и пресервов.

Обработывающие суда предназначены для приема рыбы и морепродуктов от добывающих судов, замораживания улова, выработки соленой рыбопродукции, муки и жира, изготовления консервов и пресервов. Плавучие базы, входящие в состав обрабатывающих судов, дополнительно обеспечивают добывающие суда всеми видами снабжения.

Транспортные рефрижераторные суда предназначены для приема с добывающих и обрабатывающих судов на промысле и с береговых предприятий мороженой, охлажденной и соленой рыбопродукции и доставки ее в базовые порты. Они также обеспечивают материально-техническим и продовольственным снабжением суда, находящиеся в районах промысла.

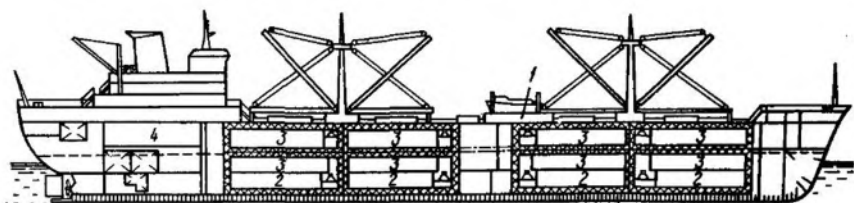


Рис. XVII.1. Продольный разрез транспортного рефрижераторного судна «Остров Русский»:

1 — рефрижераторное машинное отделение; 2 — охлаждаемые трюмы; 3 — охлаждаемые твиндеки; 4 — главное машинное отделение.

Планировки рефрижераторных судов. Планировка рефрижераторных судов зависит от типа судна, расположения машинного отделения (кормовое или центральное расположение), типа холодильной установки и охлаждающей системы (централизованная или децентрализованная холодильная установка). Продольный разрез транспортного рефрижераторного судна приведен на рис. XVII.1.

Взаимное размещение грузовых охлаждаемых помещений, рефрижераторного машинного отделения, а если судно рыбопромысловое, то и размещение технологических отделений может быть различным в зависимости от тех специфических требований, которые предъявляются к данному судну. Охлаждаемые помещения (трюмы с твиндеками) располагаются, как правило, в носовой оконечности судна, главное машинное отделение, служебные и жилые помещения для экипажа — в кормовой части. Такое расположение является наиболее целесообразным, так как способствует сокращению наружных теплопритоков в охлаждаемые помещения. На судах малого водоизмещения над трюмами твиндеков может не быть, а на средних и крупных судах над каждым трюмом располагается один или два твиндека. Подволоки твиндеков, выходящие на открытую палубу у транспортных рефрижераторных судов, являются наиболее теплонапряженными и поэтому имеют более мощную изоляцию по сравнению с другими теплоограждающими поверхностями.

Коэффициент теплопередачи для этих ограждений составляет 0,2—0,3 Вт/(м²·К), а плотность теплового потока с учетом солнечной радиации может достигать 20—32 Вт/м².

На добывающих рефрижераторных судах, в особенности на крупных, и на плавучих базах различного назначения под открытой палубой размещаются технологические линии, цехи или участки. К ним относятся разделочные линии, сортировочные участки, жиромучные и консервные цехи, посолочные участки, бункера для предварительного охлаждения рыбы, льдогенераторы, скороморозильные аппараты.

Поэтому твиндеки, как правило, размещаются под технологическими цехами для удобства загрузки охлаждаемых помещений. Трюм и твиндек могут охлаждаться отдельно, и тогда палуба, разделяющая эти помещения, должна иметь достаточную изоляцию и герметически закрывающийся люк для возможности поддержания в них различных температурных режимов. Трюм

и твиндек могут составлять единый охлаждаемый контур. В этом случае твиндечная палуба не изолируется либо имеет легкую изоляцию. На судах с воздушными системами с вертикальным восходящим потоком воздуха промежуточные твиндечные палубы имеют перфорацию по всей площади палуб для свободного прохода вентилирующего воздуха из трюма в твиндек.

При системе воздушного охлаждения воздухоохладители могут располагаться в специальных помещениях, в рубках на верхней палубе, а также в грузовых охлаждаемых помещениях, в специальных выгородках, у одной из переборок (носовой или кормовой).

Рефрижераторные машинные отделения размещаются в отдельных помещениях. Иногда, особенно на рыбопромысловых рефрижераторных судах с мощной холодильной установкой, обслуживающей потребителей холода с различными температурами кипения, не удается разместить всю холодильную установку в одном помещении. Тогда ее размещают в двух-трех помещениях, расположенных одно над другим. В этом случае в нижнем помещении находятся, как правило, компрессоры, в верхнем — аппараты.

Оборудование аммиачных холодильных установок размещают в отдельных газонепроницаемых отсеках, которые по возможности должны располагаться в местах, обеспечивающих устройство непосредственных выходов на открытую палубу. Помещения аммиачных холодильных машин и выходы из них рекомендуются оборудовать системой орошения и системой аварийной вентиляции, обеспечивающей 40-кратный обмен воздуха в час, а при наличии орошения кратность аварийной вентиляции может быть снижена до 30-кратного обмена в час. В помещении, где размещены фреоновые холодильные машины, аварийная вентиляция должна обеспечивать 20-кратный часовой обмен воздуха.

Механизмы и оборудование должны быть расположены так, чтобы обеспечивались нормальное их обслуживание и ремонт. При этом оси валов компрессоров и осевые линии кожухотрубных аппаратов и горизонтальных ресиверов должны располагаться вдоль диаметральной плоскости судна. Оборудование фреоновых холодильных установок может размещаться как в отдельных помещениях, так и в помещениях главных машин или в помещениях с другим механическим оборудованием. Помещения для фреоновых автоматизированных холодильных машин, где не предусматривается постоянная вахта, могут не иметь второго выхода.

Требования к холодильным установкам. К судовым холодильным установкам предъявляются повышенные требования безопасности и надежности. Эти требования регламентированы правилами Международных классификационных обществ, к числу которых относятся: Морской Регистр СССР, Английский Ллойд, Американское бюро судоходства, Французское бюро Веритас и др.

Классификационное общество осуществляет наблюдение за проектированием и постройкой рефрижераторных судов, а также надзор за их эксплуатацией в соответствии с требованиями Правил классификации.

Правила классификации включают в себя ряд требований, предъявляемых к холодильным машинам и установкам в отношении выбора их производительности и мощности, расчетных давлений, состава оборудования и т. д. Например, в соответствии с требованиями Регистра СССР каждая холодильная установка должна состоять минимум из двух холодильных машин, вспомогательных механизмов и аппаратов, осуществляющих нормальную циркуляцию хладагента, рассола, охлаждающей воды и воздуха. При этом холодопроизводительность установки должна быть такой, чтобы при любой выключенной машине суммарная холодопроизводительность работающих машин была бы достаточной для поддержания спецификационных температур в охлаждаемых помещениях в заданном районе плавания при их непрерывной круглосуточной работе в течение 24 ч. Правила классификации предъявляют также определенные требования к различным системам холодоснабжения, водо- и электроснабжения, к трубопроводам и арматуре, контрольно-измерительным приборам, к регулирующей и защитной автоматике, к предохранительным устройствам, к применяемым материалам. Они устанавливают нормы запасных частей, порядок и объем освидетельствований и испытаний. Кроме того, Правила классификации требуют соблюдения особых условий, предъявляемых к оборудованию грузовых охлаждаемых помещений и рефрижераторных машинных отделений.

Так, холодильные машины и аппараты должны быть изготовлены в специальном морском исполнении, которое предусматривает наличие заглубленных картеров на компрессорах, сепарирующих перегородок и цинковых протекторов в кожухотрубных аппаратах, применение специальных материалов (например, мельхиора) для трубок конденсаторов и испарителей и т. д. Механизмы и аппараты должны надежно работать в условиях длительного крена или дифферента, в агрессивных средах, какими являются морской воздух и забортная вода.

Требования Регистра СССР предусматривают обеспечение достаточной гибкости в управлении всей холодильной установкой путем резервирования основных ее механизмов, аппаратов и отдельных узлов. С этой целью предусматривается возможность работы основного и резервного оборудования таким образом, чтобы любые машины и аппараты могли обеспечивать различные потребители холода. Кроме того, на случай аварийных ситуаций в установке предусматривается достаточное количество запорных и предохранительных устройств, а в органах автоматического управления — дублирование с дополнительным ручным управлением.

В качестве хладагента для производственных целей наряду с аммиаком в последние годы широко используется R22, а для охлаждения провизионных камер — R12.

В связи с применением фреонов отпадает ряд ограничений Правил Регистра СССР, в том числе связанных с применением систем непосредственного охлаждения. Кроме того, использование фреонов позволяет существенно упростить установку. Так, в настоящее время при температурах кипения до -45°C широко используют одноступенчатые холодильные установки с винтовыми компрессорами, работающие на фреонах, тогда как при работе на аммиаке для создания таких температур требуются двухступенчатые установки.

Состав холодильной установки. Холодильная установка, работающая на R22, объединяет несколько автономных установок, обслуживающих морозильные аппараты типа АСМА и АМП-7А, трюмы мороженой продукции и льдогенераторы с температурами кипения, соответственно равными -42 , -38 и -32°C . Распределение хладагента по аппаратам осуществляется насосами, которые обеспечивают пятикратную циркуляцию фреона.

Установка с $t_0 = -42^{\circ}\text{C}$ предназначена для замораживания рыбы в двух конвейерных морозильных аппаратах АСМА и плиточном морозильном аппарате АМП-7А до температуры -23°C .

Установка с $t_0 = -38^{\circ}\text{C}$ предназначена для поддержания температуры воздуха -28°C в трех трюмах и твиндеках мороженой продукции вместимостью 3450 м^3 .

Установка с $t_0 = -32^{\circ}\text{C}$ предназначена для производства чешуйчатого льда в количестве 1000 т/ч .

Все три установки работают по схеме одноступенчатого сжатия с непосредственным охлаждением. Производительность компрессоров регулируется автоматически по давлению всасывания. Для обеспечения возврата масла из испарительной системы предусмотрен отбор с напорной линии фреоновых насосов маслофреоновой смеси, которая поступает в теплообменники-выпариватели.

Системы охлаждения рефрижераторных трюмов. На отечественных рефрижераторных судах применяют главным образом следующие системы для охлаждения рефрижераторных помещений: непосредственного охлаждения и с промежуточным хладоносителем. В качестве приборов охлаждения используют гладкотрубные батареи, панели и воздухоохладители.

Для охлаждения рефрижераторных трюмов системы непосредственного охлаждения применяют ограниченно. Их используют в основном для охлаждения провизионных камер, в которых хранятся продукты, предназначенные для питания экипажа судна. Правила Регистра СССР запрещают применение аммиачных систем непосредственного охлаждения для охлаждения грузовых помещений. Использование фреонов в качестве хладагента допускается только для грузовых охлаждаемых помещений вместимостью не более 200 м^3 и при соблюдении ряда ограничивающих условий (сварное соединение трубопроводов в пределах охлаждаемых помещений и др.).

Систему с промежуточным хладоносителем выполняют только закры-

того типа с расширительной цистерной. В каждом охлаждаемом помещении рассольный трубопровод состоит минимум из двух самостоятельных секций, каждую из которых можно отключать. Количество таких секций

$$n = Q/v\rho_r c_p \Delta t,$$

где Q — суммарная тепловая нагрузка системы в данном помещении, Вт; v — допустимая скорость рассола в трубах батарей, м/с ($v = 0,3-0,8$ м/с); f — площадь внутреннего поперечного сечения трубы батареи, м²; ρ_r — плотность рассола, кг/м³; c_p — удельная теплоемкость рассола, Дж/(кг·К); Δt — допустимый нагрев рассола в батареях, °С.

Батарей должны быть по возможности равномерно распределены по всем теплоображдающим поверхностям. От повреждения грузом бортовые и переборочные батареи защищают специальным металлическим или деревянным обрешетником.

Основные преимущества системы с промежуточным хладоносителем: безопасность и надежность в работе; большая регулирующая способность; простота регулирования и автоматизации.

Недостатки такой системы — трудность создания низких температур (-25 ÷ -30 °С), особенно при использовании однорядных батарей; уменьшение полезного объема трюмов (при использовании батарей часть его теряется из-за установки приборов охлаждения и их защитных ограждений); затрудненная санитарная обработка трюмов.

В качестве промежуточного хладоносителя используется, как правило, водный раствор СаСl₂, не замерзающий при низких температурах.

Рассольные системы подвержены коррозии, необходимым условием для возникновения которой является наличие кислорода. Поэтому систематическое удаление воздуха из испарителя и рассольных приборов охлаждения и применение других мер борьбы с коррозией является обязательным условием эксплуатации рассольных систем.

В последние годы вместо батарей для охлаждения рефрижераторных трюмов используют панели, объединенные таким образом, что они образуют охлаждаемый контур трюма или твиндека (рис. XVII.2). Такие панельные системы могут быть непосредственного охлаждения или с промежуточным хладоносителем.

Панели представляют собой специальные листотрубные батареи (рис. XVII.3), с помощью которых экранируются наружные теплоображдающие поверхности рефрижераторных помещений (борта, переборки, подволоки, двойное дно). Отбортованными фланцами 5 и 7 панель крепится к зашивке изоляции. Защитные угольники обрешетки 3, приваренные к трубам панели, предназначены для предохранения бортовых и переборочных панелей от повреждений грузом во время качки судна. Подволочные панели такого обрешетки не имеют. Угольники обрешетки являются дополнительной эффективной теплопередающей поверхностью, которая отводит 20—25% внутренних теплопритоков. Обычно предусматривают 6—10 типоразмеров панелей длиной 1180—3580 мм и шириной 730—1730 мм. Между панелями и изоляционной конструкцией образуется воздушная прослойка толщиной 40 мм, не сообщаю-

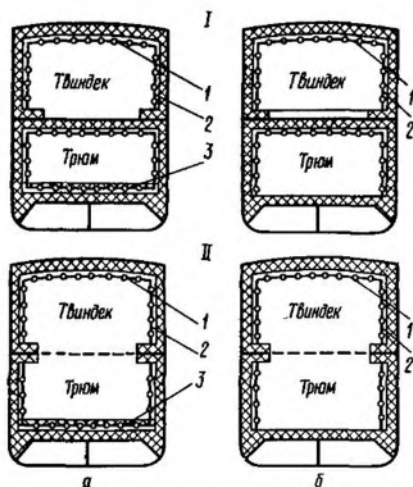


Рис. XVII.2. Схемы экранирования охлаждаемых помещений:

I — раздельно охлаждаемые трюм и твиндек; II — совместно охлаждаемые трюм и твиндек (однотемпературный контур); а — трюм с полным экранированием; б — трюм с неполным экранированием; 1 — потолочные панели; 2 — бортовые и переборочные панели; 3 — днищевые панели.

сящая с воздухом охлаждаемого помещения. Эта прослойка служит дополнительным термическим сопротивлением и позволяет при прочих равных условиях применять изоляцию меньшей толщины.

Распределение температур по высоте штабеля груза в зависимости от схемы экранирования будет различным. В трюме с полным экранированием температура груза по всей высоте штабеля практически одинакова, в трюме с неполным экранированием из-за интенсивного лучистого теплообмена с подволока трюма и худшими условиями теплоотвода у двойного дна температура груза в нижней части штабеля составляет $-24,8^{\circ}\text{C}$, а в верхней части -30°C при температуре воздуха в трюме -25°C .

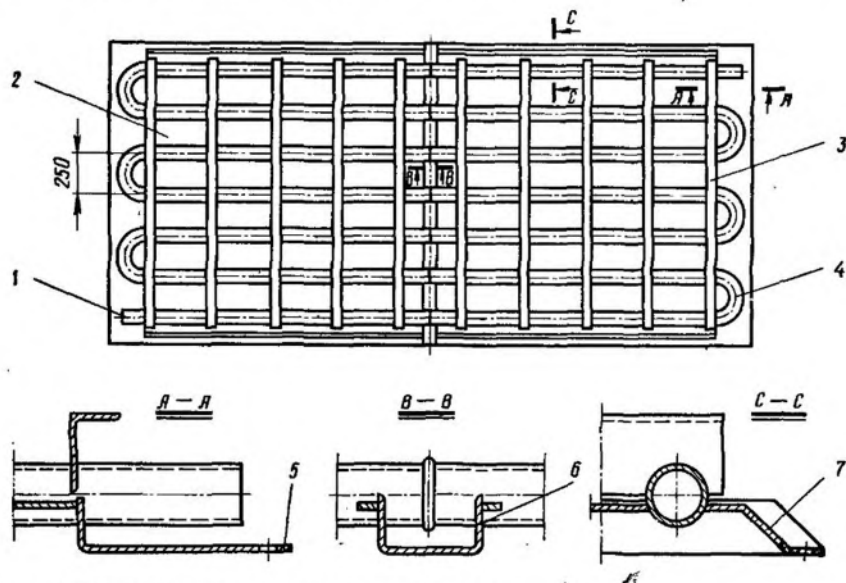


Рис. XVII.3. Панельная рассольная батарея:

1 — труба; 2 — плавниковое ребро; 3 — угольник обрешетки; 4 — калач; 5, 7 — концевые ребра крепления панели; 6 — корытчатый профиль.

Недостатки панельной системы: недостаточная эффективность работы при повышенных внутренних теплопритоках; возможность применения этой системы только для хранения мороженных грузов.

В Советском Союзе панельную систему применяют на рефрижераторных судах типа «Таврия», «Алтай», «Пионер Латвии», «Пятидесятилетие СССР».

Воздушное охлаждение применяют для грузов, перевозимых при положительной температуре, что позволяет осуществлять интенсивное охлаждение непосредственно в трюме. Это важно для специальных судов — банановозов, фруктовозов, для универсальных транспортных рефрижераторных судов, а также для рыбопромысловых плавучих баз специального назначения.

Воздухоохладители располагают в специальных рубках на верхней палубе или непосредственно в грузовых охлаждаемых помещениях. При этом воздухоохладители и вентиляторы размещены в специальных выгородках для свободного доступа к ним в процессе эксплуатации. В соответствии с Правилами Регистра СССР воздухоохладители непосредственного охлаждения, работающие на аммиаке, в грузовых помещениях не устанавливают.

Воздушные системы охлаждения (рис. XVII.4) отличаются в основном способами распределения воздуха в грузовых помещениях. Наиболее широко распространено возду хораспределение с вертикальным восходящим потоком воздуха и с грузовыми решетками. При такой схеме грузовые решетки, пред-