

СЕРГЕЕВ А.А.

**ХОЛОДИЛЬНАЯ ТЕХНИКА,
ТЕХНОЛОГИИ И
ВЕНТИЛЯЦИОННОЕ
ОБОРУДОВАНИЕ**

Ижевск 2016

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ИЖЕВСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ»

УТВЕРЖДАЮ:

проректор по учебной работе
профессор Акмаров П.Б.

«_____» _____ 2016 г.

А.А. СЕРГЕЕВ

ХОЛОДИЛЬНАЯ ТЕХНИКА, ТЕХНОЛОГИИ И ВЕНТИЛЯЦИОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Ижевск
ФГБОУ ВО Ижевская ГСХА
2016

УДК 621.56(042.4)
ББК 31.392 я73
С 32

Учебное пособие разработано в соответствии с требованиями:

1) ФГОС ВО по направлению подготовки (специальности) Агроинженерия, утвержденный МОН РФ «20» октября 2015г.

2) ФГОС ВО по направлению подготовки (специальности) «Технология продукции и организация общественного питания, утвержденный МОН РФ «12» ноября 2015г.

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом ФГБОУ ВО Ижевская ГСХА, протокол № от 2016 г.

Рецензент – Иванов А.Г., доцент кафедры «Теоретическая механика и сопротивление материалов».

Сергеев А.А.

С 32 Холодильная техника, технология и вентиляционное оборудование: Учебное пособие./А.А. Сергеев, ФГБОУ ВО Ижевская ГСХА.- Ижевск: ФГБОУ ВО Ижевская ГСХА, 2016.- 190 с.

В пособии изложены основы холодильной техники: физические принципы получения низких температур; термодинамические основы, циклы и типы холодильных машин. Рассмотрены компрессоры, теплообменные аппараты, вспомогательное оборудование, автоматизация холодильных машин и установок. Отдельный раздел посвящен глубокому охлаждению. Рассмотрены вопросы холодильной обработки и хранения пищевых продуктов. В разделе, посвященном вентиляционному оборудованию, приведены: основные понятия, свойства воздуха, способы очистки воздуха и оборудование, применяемое для этого; принципы расчета и подбора вентиляционного оборудования. Учебное пособие предназначено для студентов очной и заочной форм обучения по направлениям подготовки «Агроинженерия» и «Технология продукции и организация общественного питания», а также оно может быть полезно аспирантам и инженерно-техническим работникам, связанным с холодильной и вентиляционной техникой.

УДК 621.56(042.4)
ББК 31.392 я73

© ФГБОУ ВО Ижевская ГСХА, 2016
© Сергеев А.А., 2016

СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	7
1	Некоторые сведения из термогазодинамики	8
1.1.....	Процесс парообразования. Основные понятия и определения.....	8
1.2.....	Дросселирование. Эффект Джоуля-Томсона.....	11
2	Теоретические основы холодильной техники	15
2.1.....	Физические основы получения низких температур.....	15
2.2.....	Термодинамические основы холодильных машин.....	17
2.3.....	Термодинамические диаграммы хладагентов.....	21
2.4.....	Циклы холодильных машин.....	24
2.4.1....	Одноступенчатая холодильная машина.....	24
2.4.2....	Многоступенчатая холодильная машина.....	27
2.5.....	Холодильные агенты и хладоносители.....	32
2.5.1....	Общие сведения.....	32
2.5.2....	Теплофизические, физико-химические и физиологические свойства хладагента.....	33
2.5.3....	Области применения хладагентов.....	34
3	Холодильное оборудование	37
3.1.....	Типы холодильных машин.....	37
3.1.1....	Газовые холодильные машины.....	38
3.1.2....	Компрессионные паровые холодильные машины.....	39
3.1.3....	Абсорбционные и сорбционные холодильные машины.....	40
3.1.4....	Пароэжекторные холодильные машины.....	43
3.1.5....	Принцип действия теплового насоса.....	46
3.2.....	Компрессоры холодильных машин.....	47
3.2.1....	Поршневые компрессоры.....	48
3.2.2....	Ротационные компрессоры.....	59
3.2.3....	Винтовые компрессоры.....	61
3.2.4....	Турбокомпрессоры.....	63
3.2.5....	Спиральные компрессоры.....	64
3.3.....	Теплообменные аппараты холодильных машин.....	66
3.3.1....	Конденсаторы.....	66
3.3.2....	Испарители.....	68
3.3.3....	Охлаждающие приборы.....	70
3.4.....	Вспомогательное оборудование холодильных машин и установок.....	73
3.5.....	Автоматизация холодильных установок.....	76
4	Глубокое охлаждение	82
4.1.....	Непосредственное охлаждение.....	82
4.2.....	Простой регенеративный цикл с изоэнтальпийным расширением сжатого газа (цикл Линде).....	84
4.3.....	Регенеративный цикл с изоэнтальпийным расширением и предварительным охлаждением газа.....	86

4.4.....	Регенеративный цикл с изоэнтропийным расширением газа (цикл среднего давления Клода).....	87
4.5.....	Регенеративный цикл с изоэнтропийным расширением и низким давлением (цикл Капицы).....	88
5.....	Охлаждающие среды, их свойства и параметры.....	89
5.1.....	Атмосферный воздух.....	89
5.2.....	Газообразный диоксид углерода.....	91
5.3.....	Газообразный азот.....	92
5.4.....	Жидкие охлаждающие среды.....	93
5.5.....	Твердые охлаждающие среды.....	94
6.....	Холодильные технологии.....	97
6.1.....	Общие сведения.....	97
6.2.....	Принципы сохранения пищевых продуктов.....	97
6.3.....	Влияние низких температур на рост и размножение микроорганизмов.....	101
6.4.....	Воздействие низких температур на клетки, ткани и организмы.....	102
6.5.....	Вспомогательные средства, применяемые при холодильной обработке и хранении.....	104
6.6.....	Виды холодильной обработки пищевых продуктов.....	107
6.7.....	Теплофизические свойства пищевых продуктов и их изменения.....	117
6.8.....	Отепление и размораживание.....	121
6.9.....	Хранение пищевых продуктов у потребителя.....	129
7.....	Теоретические основы вентиляции.....	133
7.1.....	Общие понятия о вентиляции.....	133
7.1.1....	Воздухообмен в помещениях.....	133
7.1.2....	Естественная вентиляция.....	133
7.1.3....	Механическая вентиляция.....	133
7.1.4....	Принципиальные схемы вентиляционных установок.....	134
7.2.....	Воздух и его свойства.....	135
7.2.1....	Основные параметры воздуха.....	136
7.2.2....	Основные понятия о воздушном потоке.....	139
7.3.....	Пыль и пылевоздушные смеси.....	143
8.....	Вентиляционное оборудование.....	144
8.1.....	Пылеотделители.....	144
8.1.1....	Способы очистки воздуха от пыли.....	144
8.1.2....	Определение эффективности работы пылеотделителя.....	145
8.1.3....	Циклоны.....	146
8.1.4....	Порядок подбора циклона и определение его сопротивления.....	147
8.1.5....	Инерционные пылеотделители.....	148
8.1.6....	Очистка газов в электрическом поле.....	149
8.1.7....	Электрофильтры.....	152
8.1.8....	Фильтрация газовых неоднородных систем.....	153

8.1.9....	Мокрая очистка газов.....	156
8.2.....	Вентиляторы.....	162
8.2.1....	Центробежные вентиляторы.....	163
8.2.2....	Обозначение центробежных вентиляторов.....	165
8.2.3....	Осевые вентиляторы.....	166
8.2.4....	Диаметральные вентиляторы.....	168
8.2.5....	Работа вентилятора в сети.....	169
8.2.6....	Определение мощности вентилятора.....	169
8.2.7....	Подбор вентилятора для сети.....	171
8.2.8....	Законы пропорциональности.....	173
8.3.....	Расчет вентиляционных сетей.....	174
8.3.1....	Порядок расчета.....	174
8.3.2....	Потери давления в вентилируемой машине.....	175
8.3.3....	Потери давления в воздухопроводе.....	175
8.3.4....	Потери давления в фасонных частях воздухопровода.....	177
8.3.5....	Потери давления в участке воздухопровода, состоящем из прямой трубы и фасонных деталей.....	181
8.3.6....	Потери давления в участке вентиляционной сети.....	181
8.3.7....	Потери давления в разветвленной вентиляционной сети...	182
8.3.8....	Характеристика вентиляционной сети.....	186
8.3.9....	Связь между характеристикой сети и характеристикой вентилятора.....	186
	Использованные источники	189

ВВЕДЕНИЕ

Холодильное и вентиляционное оборудование является неотъемлемой частью перерабатывающей промышленности. Без него невозможно нормальное функционирование предприятий данной отрасли. Холодильная и вентиляционная техника необходима как при производстве продуктов питания, так и для их хранения. При обработке пищевых продуктов холодом замедляются биохимические процессы, в значительной степени подавляется рост и жизнедеятельность микроорганизмов, тем самым продукты сохраняют качество, вкус, питательную ценность и т.д. Холодильное консервирование – один из эффективных способов обработки и сохранения продуктов высокого качества. Наиболее распространенным и экономичным является охлаждение и хранение продуктов питания в охлажденном состоянии, позволяющее наиболее полно сохранить присущие им потребительские свойства. Однако срок хранения охлажденных пищевых продуктов ограничен, что не позволяет создать достаточные запасы и обеспечить непрерывное снабжение населения.

Для увеличения продолжительности хранения продукты замораживают, что существенно тормозит скорость процессов, влияющих на качество. Замораживание и хранение в замороженном состоянии изменяют начальное качество продуктов, но позволяют сохранить их ценные питательные свойства.

Вентиляционное оборудование позволяет поддерживать санитарно-гигиенические нормы не только на предприятиях перерабатывающей промышленности, но оно необходимо вообще во всех помещениях, где работают люди.

В учебном пособии рассматриваются физические основы и технические средства получения низких температур; термодинамические основы, устройство и принцип действия холодильных машин различных типов; компрессоры, теплообменные аппараты и вспомогательное оборудование холодильных установок. В разделе «Вентиляционное оборудование» рассматриваются принципиальные схемы вентиляционных сетей, устройство, принцип действия и расчет вентиляторов, пылеотделителей, вентиляционных сетей.

1. НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕРМОГАЗОДИНАМИКИ

1.1. Процесс парообразования. Основные понятия и определения

Рассмотрим процесс получения пара на примере воды. Для этого 1 кг воды при температуре 0°C поместим в цилиндр с подвижным поршнем. Приложим к поршню извне некоторую постоянную силу P . Тогда при площади поршня F давление будет постоянным и равным

$$p = P/F \quad (1.1)$$

Изобразим процесс парообразования, т.е. превращения вещества из жидкого состояния в газообразное, в p - v -диаграмме (рисунок 1.1).

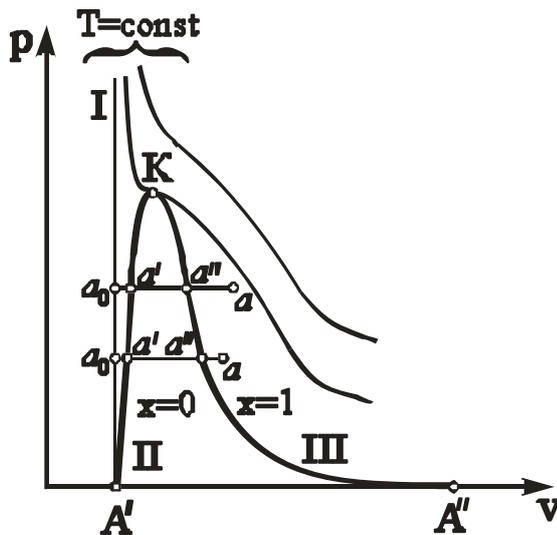


Рисунок 1.1 – p - v – диаграмма водяного пара

Начальное состояние воды, находящейся под давлением p и имеющей температуру 0°C , изобразится на диаграмме точкой a_0 . При подводе теплоты к воде ее температура постепенно повышается до тех пор, пока не достигнет температуры кипения t_s , соответствующей данному давлению. При этом удельный объем жидкости сначала уменьшается, достигает минимального значения при $t = 4^{\circ}\text{C}$, а затем начинает возрастать. (Такой аномалией – увеличением плотности при нагревании в некотором диапазоне температур – обладают немногие жидкости. У большинства жидкостей удельный объем при нагревании увеличивается монотонно). Состояние жидкости, доведенной до температуры кипения, изображается на диаграмме точкой a' .

При дальнейшем подводе теплоты начинается кипение воды с сильным увеличением объема. В цилиндре теперь находится *двухфазная среда, представляющая собой пар с взвешенными в нем капельками жидкости, называемая влажным насыщенным паром*. По мере подвода теплоты количество жидкой фазы уменьшается, а паровой – растет. Температура смеси при этом остается неизменной и равной t_s , так как вся теплота расходуется на испарение жидкой фазы. Следовательно, процесс парообразования на этой стадии являет-

ся изобарно-изотермическим. Наконец, последняя капля воды превращается в пар, и цилиндр оказывается заполненным только паром, который называется *сухим насыщенным паром*. Состояние его изображается точкой *a''*.

Насыщенным называется пар, находящийся в термическом и динамическом равновесии с жидкостью, из которой он образуется. Динамическое равновесие заключается в том, что количество молекул, вылетающих из воды в паровое пространство, равно количеству молекул, конденсирующихся на ее поверхности. В паровом пространстве при этом равновесном состоянии находится максимально возможное при данной температуре число молекул. При увеличении температуры количество молекул, обладающих энергией, достаточной для вылета в паровое пространство, увеличивается. Равновесие восстанавливается за счет возрастания давления пара, которое ведет к увеличению его плотности и, следовательно, количества молекул, в единицу времени конденсирующихся на поверхности воды. Отсюда следует, что давление насыщенного пара является монотонно возрастающей функцией его температуры, или, что то же самое, температура насыщенного пара есть монотонно возрастающая функция его давления.

При увеличении объема над поверхностью жидкости, имеющей температуру насыщения, некоторое количество жидкости переходит в пар, при уменьшении объема «излишний» пар снова переходит в жидкость, но в обоих случаях давление пара остается постоянным.

Насыщенный пар, в котором отсутствуют взвешенные частицы жидкой фазы, называется сухим насыщенным паром. Его удельный объем и температура являются функциями давления. Поэтому состояние сухого насыщенного пара можно задать любым из параметров – давлением, удельным объемом или температурой.

Массовая доля сухого насыщенного пара во влажном паре называется *степенью сухости* пара и обозначается буквой x . Массовая доля кипящей воды во влажном паре, равная $1 - x$, называется *степенью влажности*. Для кипящей жидкости $x = 0$, а для сухого насыщенного пара $x = 1$. Состояние влажного пара характеризуется двумя параметрами: давлением (или температурой насыщения t_s , определяющей это давление) и степенью сухости пара.

При сообщении сухому пару теплоты при том же давлении его температура будет увеличиваться, пар будет перегреваться. Точка *a* изображает состояние перегретого пара и в зависимости от температуры пара может лежать на разных расстояниях от точки *a''*. Таким образом, *перегретым называется пар, температура которого превышает температуру насыщенного пара того же давления.*

Так как удельный объем перегретого пара при том же давлении больше, чем насыщенного, то в единице объема перегретого пара содержится меньшее количество молекул, значит, он обладает меньшей плотностью. Состояние перегретого пара, как и любого газа, определяется двумя любыми независимыми параметрами.

Если рассмотреть процесс парообразования при более высоком давлении, то можно заметить следующие изменения. Точка a_0 , соответствующая состоя-

нию 1 кг воды при 0°C и новом давлении, остается почти на той же вертикали, так как вода практически несжимаема. Точка a' смещается вправо, ибо с ростом давления увеличивается температура кипения, а жидкость при повышении температуры расширяется. Что же касается пара (точка a''), то, несмотря на увеличение температуры кипения, удельный объем пара все-таки падает из-за более сильного влияния растущего давления.

Поскольку удельный объем жидкости растет, а пара падает, то при постоянном увеличении давления мы достигнем такой точки, в которой удельные объемы жидкости и пара сравняются. Эта точка называется **критической**. В критической точке различия между жидкостью и паром исчезают. Для воды параметры критической точки K составляют: $p_{кр} = 221,29 \cdot 10^5$ Па; $t_{кр} = 374,15^{\circ}\text{C}$; $v_{кр} = 0,00326$ м³/кг.

Критическая температура – это максимально возможная температура существования двух фаз: жидкости и насыщенного пара. При температурах, больших критической, возможно существование только одной фазы. Название этой фазы (жидкость или перегретый пар) в какой-то степени условно и определяется обычно ее температурой. **Все газы являются сильно перегретыми сверх критической температуры парами.** Чем выше температура перегрева (при данном давлении), тем ближе пар по своим свойствам к идеальному газу.

Наименьшим давлением, при котором еще возможно равновесие воды и насыщенного пара, является давление, соответствующее **тройной точке**. Под ней понимается то единственное состояние, в котором могут одновременно находиться в равновесии пар, вода и лед (точка A'). Параметры тройной точки для воды: $p_0 = 611$ Па; $t_0 = 0,01^{\circ}\text{C}$; $v_0 = 0,001$ м³/кг. Процесс парообразования, происходящий при абсолютном давлении $p_0 = 611$ Па, показан на диаграмме изобарой $A'A''$, которая практически совпадает с осью абсцисс. При более низких давлениях пар может сосуществовать лишь в равновесии со льдом. Процесс образования пара непосредственно из льда называется **сублимацией**.

Если теперь соединить одноименные точки плавными кривыми, то получим **нулевую изотерму I**, каждая точка которой соответствует состоянию 1 кг воды при 0°C и давлению p , **нижнюю пограничную кривую II**, представляющую зависимость от давления удельного объема жидкости при температуре кипения, и **верхнюю пограничную кривую III**, дающую зависимость удельного объема сухого насыщенного пара от давления.

Все точки горизонталей между кривыми II и III соответствуют состояниям влажного насыщенного пара, точки кривой II определяют состояние кипящей воды, точки кривой III - состояния сухого насыщенного пара. Влево от кривой II до нулевой изотермы лежит область некипящей однофазной жидкости, вправо от кривой III - область перегретого пара. Таким образом, кривые II и III определяют область насыщенного пара, отделяя ее от области воды и перегретого пара, и поэтому называются **пограничными**. Выше точки K , где пограничных кривых нет, находится область однофазных состояний, в которой нельзя провести четкой границы между жидкостью и паром.

1.2. Дросселирование. Эффект Джоуля – Томсона

Из опыта известно, что если на пути струи газа или жидкости, протекающей по трубе или какому-либо другому каналу, встречается препятствие, приводящее к внезапному резкому сужению поперечного сечения струи, а затем сечение струи увеличивается, то давление протекающего газа (жидкости) за препятствием всегда оказывается меньшим, чем перед ним. Такое препятствие называют местным сопротивлением.

Эффект падения давления струи рабочего тела в процессе протекания через сужения в канале называют **дросселированием**.

Выясним основные закономерности процесса дросселирования.

Физически падение давления за местным сопротивлением обусловлено диссипацией энергии потока, расходуемой на преодоление этого местного сопротивления.

Рассмотрим процесс течения газа (жидкости) через трубу, имеющую местное сопротивление, например, диафрагму (рисунок 1.2).

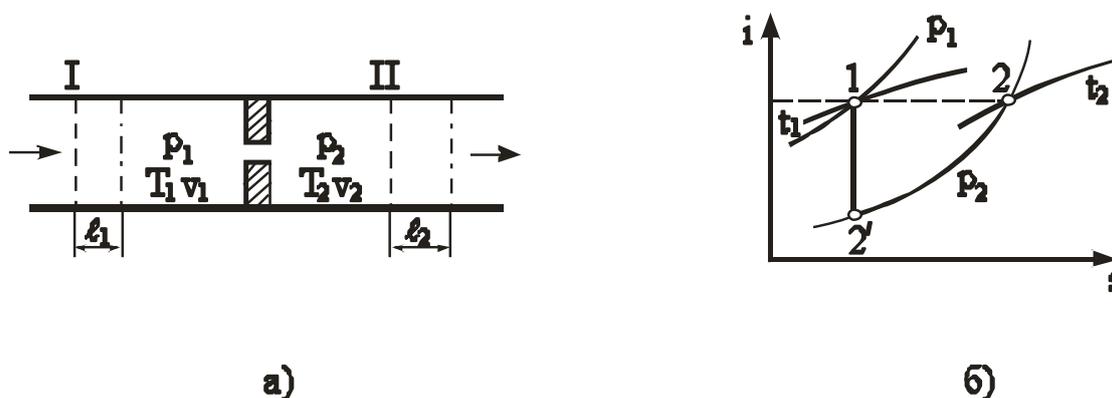


Рисунок 1.2 – Процесс дросселирования газа (жидкости) через трубу, имеющую диафрагму

Сечение трубы до и после диафрагмы считаем одинаковым. Скорость потока до и после диафрагмы считаем пренебрежимо малой; это позволяет пренебречь значением кинетической энергии потока по сравнению с ее энтальпией.

В процессе дросселирования к рабочему телу может подводиться теплота. Рассмотрим в первую очередь такой процесс дросселирования, в котором к газу (жидкости) не подводится и от него не отводится теплота – так называемое адиабатное дросселирование. Считаем, что стенки трубы окружены идеальной теплоизоляцией, исключаяющей теплообмен с окружающей средой.

Рассмотрим массу газа, заключенного в данный момент между сечениями I (до местного сопротивления) и II (за сопротивлением) (рисунок 1.2.а). Поскольку газ движется, то, естественно, зафиксированные нами сечения газа (или невесомые поршни) I и II перемещаются вдоль трубы. Площадь сечения трубы, т.е. площадь сечения этих условных поршней, обозначим F . Давление, удель-

ный объем и температуру газа до диафрагмы обозначим p_1, v_1, T_1 , после диафрагмы p_2, v_2, T_2 .

За некоторый промежуток времени поршень I переместится вдоль трубы на расстояние l_1 , поршень II - на расстояние l_2 ; поскольку давление и плотность газа за диафрагмой меньше, чем перед диафрагмой, очевидно, $l_2 > l_1$. Для того чтобы переместить поршень I на расстояние l_1 , нужно совершить работу, равную:

$$L_I = p_1 l_1 F. \quad (1.2)$$

Обозначим:

$$V_1 = l_1 F; \quad (1.3)$$

здесь V_1 – объем газа, вытесненный поршнем I за рассматриваемый промежуток времени через диафрагму.

Так как

$$V_1 = v_1 G, \quad (1.4)$$

где G – масса газа, прошедшего через дроссель, кг; v_1 – удельный объем газа до дросселирования, $\text{м}^3/\text{кг}$,

то

$$L_I = p_1 v_1 G. \quad (1.5)$$

Аналогичным образом подсчитывается работа, которую производит, перемещаясь, поршень II против давления p_2 :

$$L_{II} = p_2 v_2 G. \quad (1.6)$$

При перемещении рассматриваемой нами фиксированной массы газа за определенный промежуток времени совершается работа, равная разности работ, которую *производит* поршень II, и работы, которая *производится над* поршнем I:

$$L = L_{II} - L_I, \quad (1.7)$$

или в соответствии с (1.5) и (1.6)

$$L = (p_2 v_2 - p_1 v_1) G. \quad (1.8)$$

Эта работа затрачивается на преодоление местного сопротивления, превращаясь в теплоту. Величину $(p_2 v_2 - p_1 v_1)$ принято называть работой проталкивания.

Мы рассматриваем адиабатное дросселирование, а работа в адиабатном процессе может быть произведена только за счет уменьшения внутренней энергии системы. Следовательно,

$$L = (u_1 - u_2) G, \quad (1.9)$$

где u_1 и u_2 – внутренняя энергия единицы массы газа соответственно до диафрагмы и после нее.

Приравнивая между собой правые части уравнений (1.8) и (1.9), получаем:

$$u_1 + p_1 v_1 = u_2 + p_2 v_2, \quad (1.10)$$

или, что то же самое,

$$i_1 = i_2, \quad (1.11)$$

где i – энтальпия.

Мы получили важный вывод – уравнение (1.11) показывает, что в результате адиабатного дросселирования значения энтальпий рабочего тела до местного сопротивления и после него одинаковы.

Энтальпия (теплосодержание) – *это функция состояния, равная сумме внутренней энергии и потенциальной энергии давления.*

Мы рассматриваем здесь состояния дросселируемого вещества до дросселя и за дросселем. Следует заметить, что при течении газа (жидкости) внутри дросселя энтальпия газа (жидкости) может изменяться. В самом деле, поскольку дроссель или другое местное сопротивление представляет собой сужение проходного сечения трубы, при протекании через дроссель газ (жидкость) ускоряется, его кинетическая энергия возрастает и, следовательно, энтальпия уменьшается. После того как за дросселем сечение потока газа (жидкости) снова возрастает, поток замедляется (тормозится), его кинетическая энергия уменьшается, и энтальпия увеличивается до прежнего значения.

На рисунке 1.2.б представлена *is*-диаграмма (*s* – энтропия). Здесь участок 1-2' отражает процесс уменьшения энтальпии в дросселе при падении давления от p_1 до p_2 ; участок 2'-2 – процесс торможения потока за дросселем, в результате которого кинетическая энергия потока уменьшается, а энтальпия восстанавливается до первоначального значения.

Рассмотрим теперь, как изменяется температура газа или жидкости в процессе адиабатного дросселирования. Поскольку процесс характеризуется условием $i = \text{const}$, для решения этого вопроса нужно знать значение производной $(\partial T/\partial p)_i$. Она определяется формулой:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_i = \left[T \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v \right] / c_p, \quad (1.12)$$

где c_p – теплоемкость газа (жидкости) при $p = \text{const}$ (Дж/(кг·К)).

Величину $(\partial T/\partial p)_i$ называют **коэффициентом адиабатного дросселирования или дифференциальным дроссель-эффектом**; его обозначают:

$$\alpha_i = \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_i. \quad (1.13)$$

В общем случае величина α_i отлична от нуля. Явление изменения температуры газов и жидкостей при адиабатном дросселировании называют **эффектом Джоуля-Томсона**; величину α_i часто называют коэффициентом Джоуля-Томсона.

Изменение температуры газа (жидкости) в процессе адиабатного дросселирования при значительном перепаде давления на дросселе называют **интегральным дроссель-эффектом**; он вычисляется из соотношения:

$$T_2 - T_1 = \int_{p_1}^{p_2} \alpha_i dp, \quad (1.14)$$

где T_1 и T_2 – температуры дросселируемого вещества соответственно перед дросселем и за ним.

Интегральный дроссель-эффект может достигать весьма большого значения. Например, при адиабатном дросселировании водяного пара от давления 29400 кПа (300 кгс/см²) и температуры 450⁰С до давления 98 кПа (1 кгс/см²) температура пара уменьшается до 180⁰С (т.е. на 270⁰С).

Как показывает опыт, для одного и того же вещества знак α_i оказывается различным в разных областях состояния. Состояние газа (жидкости), в котором α_i равно нулю, называют **точкой инверсии** эффекта Джоуля-Томсона. Геометрическое место точек инверсии на диаграмме состояния данного вещества называют **кривой инверсии**.

Точки на кривой инверсии удовлетворяют уравнению:

$$\alpha_i = 0. \quad (1.15)$$

Пользуясь этим уравнением, можно найти кривую инверсии с помощью уравнения состояния вещества.

При начальных температурах газа, которые меньше температуры инверсии, газ при дросселировании будет охлаждаться, а при начальных температурах больше температуры инверсии – нагреваться.

Большинство газов, за исключением водорода и гелия, имеет довольно высокую температуру инверсии (600⁰С и выше), поэтому практически для всех газообразных веществ в области, близкой к критической, адиабатное дросселирование приводит к понижению температуры.

Контрольные вопросы

1. Дать определение влажного насыщенного пара.
2. Дать определение сухого насыщенного пара.
3. Дать определение насыщенного пара.
4. Дать определение степени сухости пара.
5. Дать определение степени влажности пара.
6. Дать определение перегретому пару.
7. Какая точка называется критической?
8. Какая точка называется тройной?
9. Что такое газ?
10. Какой процесс называют дросселированием?
11. Дать определение энтальпии.
12. Дать определение эффекту Джоуля-Томсона.
13. Что такое интегральный дроссель-эффект?
14. Дать определения точке инверсии и кривой инверсии.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ХОЛОДИЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

2.1. Физические основы получения низких температур

Охлаждение - процесс понижения температуры тела путем отвода от него теплоты. Различают естественное и искусственное охлаждение. При естественном охлаждении теплота самопроизвольно переходит от более горячего тела к менее горячему. Под искусственным понимают охлаждение тела до температур ниже температуры окружающей среды. Для создания низких температур применяют физические процессы, которые сопровождаются поглощением теплоты. К ним относятся:

1. **Фазовый переход вещества**, при котором происходит поглощение теплоты извне:
 - плавление или таяние при переходе тела из твердого состояния в жидкое;
 - испарение или кипение при переходе тела из жидкого состояния в парообразное;
 - сублимация при переходе из твердого состояния непосредственно в газообразное

Для получения низких температур, но не ниже 0°C , может быть применен водный лед, который при атмосферном давлении плавится при 0°C и имеет сравнительно большую величину удельной теплоты плавления 335 кДж/кг . При давлении ниже атмосферного сублимация водного льда происходит при температуре ниже 0°C , что используют при сублимационной сушке пищевых продуктов.

Более низкие температуры плавления можно получить, смешивая лед с некоторыми солями, например с хлоридом кальция. Благодаря добавлению соли к дробленому водному льду скорость таяния увеличивается, а температура таяния понижается. Это объясняется тем, что в результате добавления соли ослабляются силы молекулярного сцепления и разрушаются кристаллические решетки льда. Таяние льда протекает с отбором теплоты из окружающей среды. В местах соприкосновения льда и соли образуется рассол, который охлаждается за счет теплоты плавления льда и растворения соли. С повышением процентного содержания соли в льдосоляной смеси ее температура таяния понижается, а холодопроизводительность уменьшается.

Самая низкая температура плавления смеси соли со льдом называется криогидратной или **эвтектической**, а раствор соли **эвтектическим**. Например, для хлорида кальция криогидратная температура составляет -55°C при массовой концентрации соли $29,9\%$, а для хлорида натрия $-21,2^{\circ}\text{C}$ при массовой концентрации $23,1\%$.

Для охлаждения пищевых продуктов с помощью эвтектического льда его специально изготавливают из водных растворов солей в концентрациях, соответствующих криогидратной точке, получая однородную смесь кристаллов льда и соли. Эвтектическим раствором заполняют специальные формы - зеро-

торы, наглухо запаивают и замораживают. Для увеличения площади теплообмена поверхность зеротора делают гофрированной. Зероторы с замороженным раствором помещают в охлаждаемые объемы. После того как лед растает, охладив объем камеры, зероторы повторно направляют на замораживание.

Получение низких температур в результате использования процесса кипения распространено более широко. С помощью одного вещества можно получить определенный интервал температур, так как температура кипения вещества зависит от давления: с уменьшением давления температура кипения его понижается, и наоборот.

Процесс испарения используют, например, для понижения температуры воды или влажных поверхностей.

Процесс перехода вещества из твердого состояния в газообразное, минуя жидкое, называется сублимацией. В качестве рабочего тела для охлаждения объектов наиболее широко применяют твердый диоксид углерода CO_2 (сухой лед). Температура сублимации CO_2 при атмосферном давлении равна $-78,9^\circ\text{C}$, теплота сублимации 574 кДж/кг.

Преимущества сухого льда перед водным льдом:

- массовая холодопроизводительность в 2 раза, а объемная в 3 раза больше, чем водного льда;
- сухой лед не имеет жидкой фазы, а выделяющаяся при сублимации углекислота повышает холодопроизводительность почти на 10%;
- отсутствие застоя воздуха в охлаждаемом помещении, так как газообразная углекислота в процессе сублимации частично вытесняет воздух.

2. **Адиабатным дросселированием** называется процесс необратимого перехода реального газа (жидкости) с высокого давления на низкое (расширение) при прохождении его через сужение поперечного сечения (перегородка с отверстием, капиллярная трубка, пористая перегородка и т.п.) без совершения внешней работы и без теплообмена с окружающей средой, т.е. энтальпия остается постоянной.

В узком сечении скорость потока возрастает, внутренняя энергия расходуется на преодоления трения между молекулами, что приводит к изменению температуры газа.

3. При **адиабатном расширении газа** с совершением полезной внешней работы получение низких температур возможно при любом состоянии газа, так как температура изменяется в сторону понижения. В отличие от адиабатного дросселирования, в этом случае эффект возможен и для идеального газа, при этом величина понижения температуры в процессе адиабатного расширения газа при прочих равных условиях бывает больше, чем в процессе адиабатного дросселирования.

Машины, предназначенные для адиабатного расширения с совершением внешней работы, называют *детандерами*.

4. **Вихревой эффект** достигается в вихревых трубах при подаче в них по тангенциальному вводу сжатого воздуха, имеющего температуру окружающей среды. Скорость вращения воздуха в трубе обратно пропорциональна радиусу.

Центральная часть вращающегося потока имеет бóльшую скорость, чем периферийная, вследствие чего температура воздуха у стенки трубы выше, а в центре ниже, чем температура подаваемого в трубу воздуха. Можно получить потоки воздуха с низкой и высокой температурами, если разделить центральную и периферийную части потока. Это явление называется эффектом Ранка.

5. **Термоэлектрический эффект** (эффект Пельтье) заключается в следующем: при прохождении постоянного электрического тока через цепь, состоящую из двух разнородных проводников, или полупроводников, один из спаев имеет низкую температуру, а другой - высокую.

Холодный спай термоэлемента, состоящего из двух ветвей, соединенных токоведущими шинами, является источником низкой температуры.

Основной показатель качества термоэлемента – коэффициент добротности (эффективность вещества), определяющий максимальную разность температур горячего и холодного спаев.

Таким образом, осуществляя определенный физический процесс, можно получить источник требуемой низкой температуры, необходимый для понижения температуры тела, т.е. для его охлаждения.

Для осуществления процесса охлаждения необходимо иметь два тела: охлаждаемое и охлаждающее - источник низкой температуры. Охлаждение продолжается, пока между телами происходит теплообмен. Источник низкой температуры должен функционировать постоянно, так как охлаждение должно осуществляться непрерывно. Это возможно при достаточно большом запасе охлаждающего вещества или при его конечном количестве, если восстанавливать первоначальное состояние вещества. Последний метод непрерывного получения низкой температуры широко применяется в холодильной технике с использованием различных холодильных машин.

2.2. Термодинамические основы холодильных машин

Для непрерывного охлаждения машинными способами помимо охлаждаемого тела и приемника теплоты требуется еще третье тело, переносящее теплоту от первого ко второму. Это третье тело называется *рабочим телом*, или *холодильным агентом (хладагентом)*.

Хладагент, претерпевая ряд изменений, должен быть возвращен в первоначальное состояние, совершая непрерывно круговой процесс, или цикл.

В отличие от цикла тепловой машины (прямого цикла), когда работа производится при переходе теплоты от более нагретого тела к менее нагретому, в цикле холодильной машины (обратном цикле) теплота передается от менее нагретого тела к более нагретому, при этом необходима затрата работы или подвод теплоты. В обратном цикле работа сжатия хладагента превышает работу его расширения.

Различают три вида обратного цикла (рисунок 2.1):

- холодильный 1-2-3-4, в котором теплота переносится от охлаждаемого тела с температурой T_n к окружающей среде с температурой T_{oc} ;

- теплового насоса 5-6-7-8, в котором теплота переносится от окружающей среды к телу с более высокой температурой T_B ;
- комбинированный 9-10-11-12, состоящий из двух первых.

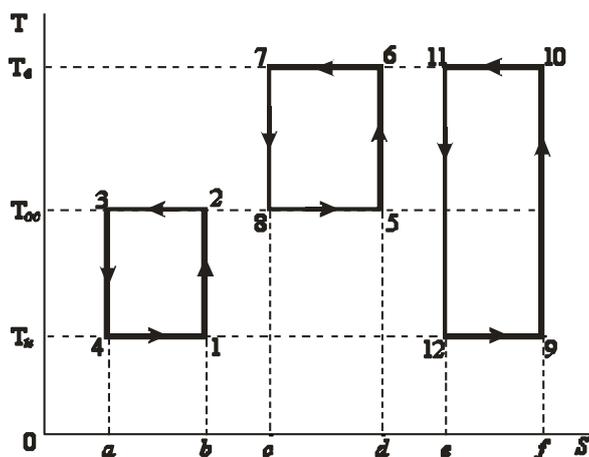


Рисунок 2.1 – Обратные циклы Карно

Рассмотрим холодильный цикл. На первом участке цикла хладагент в результате теплообмена получает теплоту от охлаждаемого тела (участок 4-1). При этом он переходит из жидкого состояния в парообразное и температура его не изменяется. Полученная теплота должна быть передана приемнику теплоты, которым является обычно окружающая среда (атмосферный воздух, вода). Но самопроизвольно такой переход теплоты невозможен, так как температура окружающей среды выше, чем температура хладагента. Для того чтобы хладагент мог передать полученную теплоту окружающей среде, необходимо на втором участке цикла подвести к нему энергию в виде работы или теплоту для повышения его температуры выше температуры окружающей среды (участок 1-2). Именно этот теплообмен между хладагентом и окружающей средой происходит на третьем участке цикла (2-3), при этом хладагент переходит в жидкое состояние. На последнем участке цикла (3-4) хладагент возвращается в первоначальное состояние.

Если при осуществлении процессов, образующих обратный цикл, у взаимодействующих тел не наблюдаются остаточные изменения, т.е. эти процессы обратимы, то и обратный цикл обратим. На осуществление обратимого цикла требуется минимум работы или теплоты, поэтому он является эталоном. Обратимый холодильный цикл 1-2-3-4, приведенный на рисунке 2.1, показан в координатах $T-s$ (абсолютная температура - энтропия).

Энтропия – функция состояния термодинамической системы, определяемая отношением изменения количества теплоты к температуре в процессе и характеризующая направление протекания процесса теплообмена между системой и внешней средой.

Как видно из рисунка, он должен состоять из двух изотермических и двух адиабатных процессов. Такой цикл называется циклом Карно.

В изотермическом процессе 4-1 каждый килограмм циркулирующего хладагента получает от охлаждаемого тела теплоту q_0 , которая называется

удельной массовой холодопроизводительностью хладагента, представляет собой площадь $a-4-1-b$ и выражается равенством

$$q_0 = T_n (s_b - s_a). \quad (2.1)$$

В адиабатном процессе 1-2 при затрате работы L_k хладагент сжимается и его температура повышается от T_n до T_{oc} . В изотермическом процессе 2-3 каждый килограмм циркулирующего хладагента отдает окружающей среде теплоту q , измеряемую площадью $a-3-2-b$:

$$q = T_{oc}(s_b - s_a). \quad (2.2)$$

В заключительном адиабатном процессе 3-4 хладагент расширяется с получением работы L_p , и в результате температура хладагента понижается от T_{oc} до T_n .

Работа цикла L превращается в теплоту, подводимую к хладагенту, и определяется как разность работы, затраченной на сжатие хладагента L_k и работы, полученной при расширении хладагента L_p :

$$L = L_k - L_p. \quad (2.3)$$

В соответствии с первым началом термодинамики сумма энергии, подведенной к хладагенту, должна быть равна сумме энергии, отведенной от него:

$$q = q_0 + L. \quad (2.4)$$

Отсюда

$$L = q - q_0.$$

В Ts - диаграмме работа цикла выражается площадью 1-2-3-4.

Отношение теплоты, полученной хладагентом от охлаждаемого тела q_0 , к работе цикла L называется холодильным коэффициентом, который характеризует эффективность осуществления холодильного цикла:

$$\varepsilon = \frac{q_0}{L} = \frac{q_0}{q - q_0} = \frac{T_n}{T_{oc} - T_n} \quad (2.5)$$

Из этого выражения следует, что при температуре окружающей среды T_{oc} затрата работы на единицу отведенной теплоты будет тем больше, чем ниже температура T_n . **Совокупность технических устройств, обеспечивающих осуществление холодильного цикла, называется холодильной машиной.**

Обратимый цикл теплового насоса также может быть представлен циклом Карно 5-6-7-8 (рисунок 2.1).

В этом случае теплота q_0 , полученная 1 кг хладагента от окружающей среды, соответствует площади $c-8-5-d$, а теплота, отданная телу с высокой температурой q_b , выражается площадью $c-7-6-d$.

Работа цикла $L = q_b - q_0$ соответствует площади 5-6-7-8.

Эффективность цикла теплового насоса определится отношением полученной теплоты к затраченной работе:

$$\xi = \frac{q_b}{L} = \frac{T_b}{T_b - T_{oc}} \quad (2.6)$$

Это отношение называют **коэффициентом преобразования теплоты ξ** .

Как следует из этого выражения, величина ξ всегда больше единицы. Это свидетельствует о том, что с энергетической точки зрения для отопления целесообразнее применять цикл теплового насоса, чем электрический нагреватель.

Но при этом надо учитывать, что стоимость холодильного оборудования выше, чем теплового.

Работа комбинированного обратного цикла соответствует площади 9-10-11-12, а отведенная от охлаждаемого тела теплота - площади e-12-9-f (см. рисунок 2.1). По такому принципу могут работать машины, одновременно охлаждающие, например, пищевые продукты и нагревающие воду (или воздух) для технологических либо бытовых целей.

В случаях, когда температура охлаждаемого тела переменна, а окружающей среды постоянна, надо иметь в виду, что холодильный коэффициент цикла Карно будет меньше, чем холодильный коэффициент соответствующего обратного цикла при неизменной температуре охлаждаемого тела.

Реальные циклы являются необратимыми вследствие необратимости действительных процессов, происходящих при их осуществлении, таких как: теплообмена при конечной разности температур, расширения и сжатия при наличии трения, дросселирования.

Термодинамическое совершенство цикла определяется сопоставлением его с обратимым циклом, имеющим ту же величину удельной массовой холодопроизводительности, и оценивается *коэффициентом обратимости η* , равным отношению их холодильных коэффициентов:

$$\eta = \varepsilon / \varepsilon^{\text{обр}} = L^{\text{обр}} / L, \quad (2.7)$$

где ε - холодильный коэффициент реального цикла;

L - работа реального цикла.

Холодильный коэффициент обратимого цикла Карно $\varepsilon^{\text{обр}}$ больше холодильного коэффициента любого из циклов, осуществляемых в тех же температурных пределах, поэтому $\varepsilon < \varepsilon^{\text{обр}}$ и $\eta < 1$. Чем больше необратимость (приращение энтропий) цикла, тем большую работу надо затратить для получения одного и того же полезного эффекта.

В зависимости от рабочего тела (хладагента) холодильные машины, в основе принципа действия которых лежит обратный цикл Карно, подразделяют на паровые и газовые. В испарителе паровой холодильной машины происходит испарение хладагента при переходе к нему теплоты от охлаждаемого объекта, а в конденсаторе - его конденсация при переходе теплоты от хладагента в окружающую среду.

В паровых холодильных машинах в качестве рабочего тела используют аммиак и хладоны (фреоны) – фтористые и хлористые производные предельных углеводородов; в газовых холодильных машинах – воздух.

Паровые холодильные машины в зависимости от способа подачи рабочего тела в конденсатор подразделяют на:

- компрессионные;
- абсорбционные;
- сорбционные;
- парожетторные.

В паровых и газовых компрессионных холодильных машинах рабочий цикл совершается за счет механической работы компрессора. В абсорбцион-

ных, сорбционных и парожеткторных холодильных машинах рабочий цикл осуществляется за счет затраты теплоты.

Для получения требуемых температур кипения и конденсации рабочего тела используют одноступенчатые, многоступенчатые и каскадные паровые компрессионные машины. Соответственно в одноступенчатых используют один, а в многоступенчатых и каскадных – два и более компрессоров, которые обеспечивают осуществление холодильного цикла в каждой ступени машины. Для холодильной обработки и хранения пищевых продуктов в охлаждаемых камерах используют преимущественно паровые компрессионные одно- и двухступенчатые холодильные машины.

2.3. Термодинамические диаграммы хладагентов

При работе холодильной машины в ней непрерывно происходят процессы, изменяющие агрегатное состояние хладагента и его параметры. Надежная эксплуатация холодильной машины невозможна без правильного понимания происходящих в ней термодинамических процессов. Для определения параметров хладагента при изучении отдельных процессов, входящих в цикл паровой холодильной машины, а также отдельных характеристик холодильной машины используют термодинамические диаграммы хладагентов. Умение пользоваться диаграммами позволяет осуществлять контроль и анализ параметров действующих машин, настройку приборов автоматики и расчет циклов холодильных машин.

Для каждого хладагента существуют свои диаграммы, но принцип их построения и пользования ими одинаков. На практике наибольшее применение находят диаграммы энтальпия - давление ($i - \lg p$) и температура – энтропия ($T - s$). На диаграмме $i - \lg p$ теплота и работа для адиабатного процесса изображаются отрезками по оси абсцисс, а на диаграмме $T - s$ - площадями.

Рассмотрим диаграмму $i - \lg p$ (рисунок 2.2).

На рисунке 2.2,а приведены области фазового перехода хладагента, отделенные одна от другой кривыми насыщенной жидкости и насыщенного пара. Слева от кривой насыщенной жидкости находится область переохлажденной жидкости I. Между кривыми насыщенных жидкости и пара расположена область влажного пара III. Влажный пар представляет собой смесь насыщенной жидкости и насыщенного пара, находящуюся либо в состоянии кипения, либо в состоянии конденсации. Фазовый переход от жидкости к пару происходит слева направо (кипение), а из пара в жидкость – справа налево (конденсация). Содержание пара в парожидкостной смеси определяет линия постоянного паросодержания $x = \text{const}$, показывающая массовую долю пара в парожидкостной смеси в долях единицы (рисунок 2.2,б). На линии насыщенной жидкости паросодержание $x = 0$, на линии насыщенного пара $x = 1$.

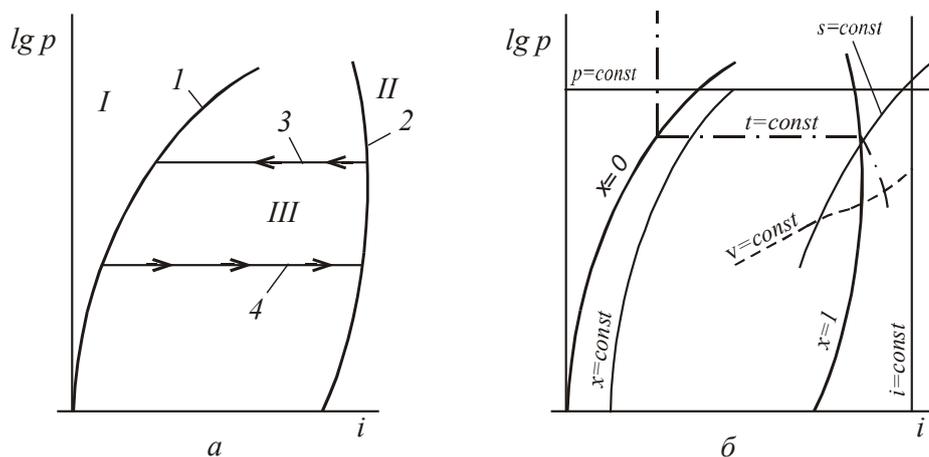


Рисунок 2.2 – Диаграмма $i - \lg p$ параметров хладагентов:

а - зоны фазового перехода; б - кривые основных параметров:

I - область переохлажденной жидкости; II - область перегретого пара; III - область влажного насыщенного пара; 1 - кривая насыщенной жидкости; 2 - кривая насыщенного пара; 3 - линия конденсации пара; 4 - линия кипения жидкости.

Область перегретого пара II отражает состояние пара с температурой выше температуры насыщения при соответствующем давлении. Показанная на рисунке 2.2,б диаграмма $i - \lg p$ отражает шесть параметров хладагента, изображенных в виде линий. Численные значения основных параметров (кроме температуры и давления) приведены в удельных величинах, отнесенных к 1 кг хладагента.

Линии постоянного паросодержания x проходят в области влажного пара.

Линии постоянного давления p – изобары – проходят горизонтально через все области фазового перехода. Для удобства пользования диаграммой и вследствие неравномерности шкалы давлений в области вакуума и избыточного давления по оси ординат применен логарифмический масштаб ($\lg p$).

Линии постоянных температур t ($^{\circ}\text{C}$) – изотермы – в области переохлажденной жидкости проходят вертикально, в области влажного пара – горизонтально. В этой области изотермы совпадают с изобарами, так как фазовое состояние хладагент меняет при постоянных значениях t и p . В области перегретого пара изотермы с наклоном идут вниз.

Линии постоянных удельных энтальпий I – изоэнтальпы – проходят вертикально. Изменение удельной энтальпии в термодинамическом процессе при $p = \text{const}$ равно удельному количеству подведенной теплоты.

Линии постоянных удельных объемов v ($\text{м}^3/\text{кг}$) – изохоры – обозначены прерывистыми линиями, проходящими в области влажного и перегретого пара. В области жидкости изохоры не показаны из-за слишком малого объема жидкости по сравнению с объемом пара, поэтому данный параметр по диаграмме не определяется (его можно найти по таблице насыщенных паров хладагента).

Линии постоянных удельных энтропий s [$\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$] – адиабаты – проходят через поле диаграммы в виде наклонных кривых.

Каждой точке на поле диаграммы соответствует состояние хладагента с определенными параметрами. Соединение двух точек линией указывает на характер процесса, протекающего между двумя состояниями.

Рассмотрим диаграмму T-s (рисунок 2.3).

Данная диаграмма отображает четыре параметра хладагента. Численные значения энтальпии и энтропии приведены в удельных величинах, отнесенных к 1 кг хладагента. В нижней части диаграммы имеются линии жидкости и пара, сходящиеся в одной точке $T_{кр}$, которая соответствует критической температуре. Область b - $T_{кр}$ - a, лежащая левее кривой, является областью переохлажденной жидкости, область b - $T_{кр}$ - c - под кривой - областью влажного пара. Область a - $T_{кр}$ - c, размещенная выше и правее кривой, соответствует перегретому пару.

Изотермы (в K) проходят через все области горизонтально. Изобары в области влажного пара совпадают с изотермами, а в области перегретого пара идут вправо вверх. Изоэнтальпы расположены на поле диаграммы примерно по диагонали слева направо.

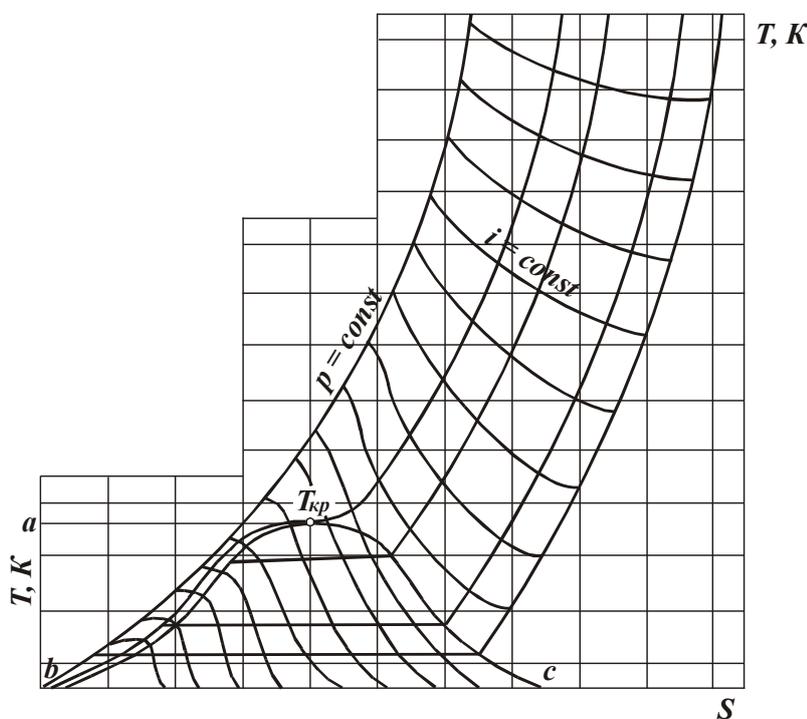


Рисунок 2.3 – Диаграмма T-s параметров хладагентов

Контрольные вопросы

1. Какие физические процессы применяются для создания низких температур?
2. Какие процессы относятся к фазовому переходу вещества?
3. Какая температура называется криогидратной или эвтектической?
4. Что такое зероторы?
5. В чем отличие процесса плавления от сублимации?
6. Что такое льдосоляное охлаждение и в чем его преимущество перед ледяным?
7. Что такое сухой лед и в чем его преимущество перед водным?

8. Дать определения энтальпии и энтропии.
9. Что такое точка инверсии?
10. Чем отличаются адиабатное дросселирование и адиабатное расширение?
11. Что называется холодильным агентом?
12. Дать определение обратному и обратимому циклам.
13. Какие виды обратного цикла существуют?
14. Как оценивается работа холодильной машины?
15. Как оценивается термодинамическое совершенство цикла?
16. Как классифицируют холодильные машины?
17. Какие термодинамические диаграммы хладагентов получили наиболее широкое применение и какие параметры они отражают?

2.4. Циклы холодильных машин

2.4.1. Одноступенчатая паровая холодильная машина

При описании принципа действия паровой холодильной машины различают теоретический и действительный цикл. **Теоретическим** называют цикл, при котором пар хладагента из испарителя засасывается в компрессор в состоянии насыщения при температуре и давлении кипения, а жидкость из конденсатора поступает в редукционный вентиль в состоянии насыщения при температуре и давлении конденсации. Кроме того, считается, что в системе нет потерь давления из-за сопротивления трубопроводов и аппаратов, а процесс сжатия в компрессоре – адиабатный.

Для эксплуатации холодильных установок интерес представляет **действительный** цикл, который и будет рассмотрен (рисунок 2.4).

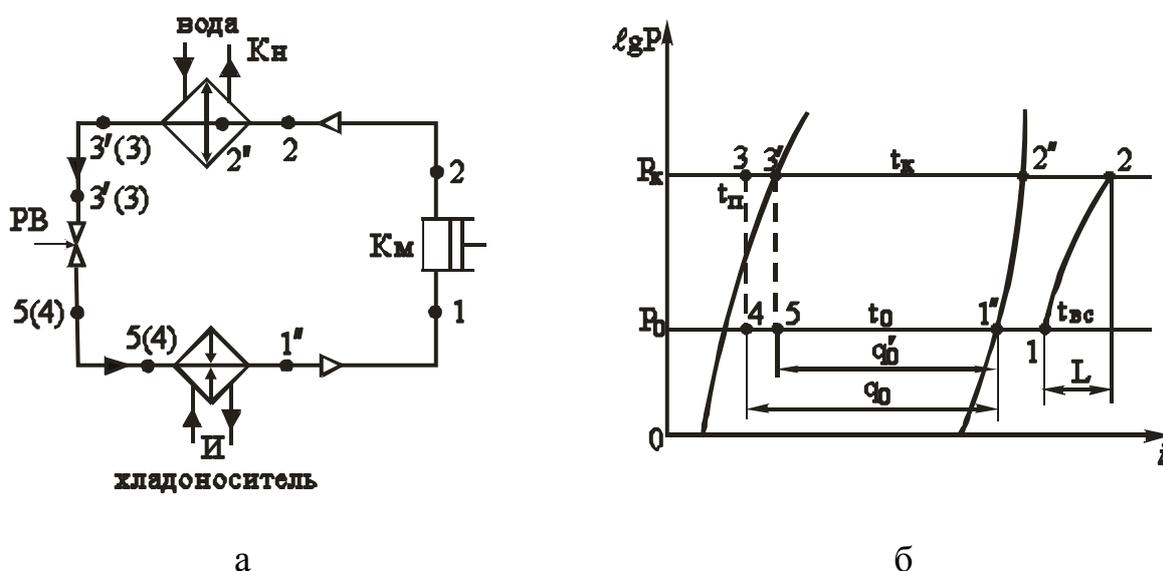


Рисунок 2.4 – Одноступенчатая холодильная машина:

а) функциональная схема; б) цикл

Км – компрессор, Кн – конденсатор, И – испаритель,
РВ – редукционный вентиль, L - работа сжатия

В основе искусственного охлаждения лежит процесс кипения хладагента в испарителе, в результате чего он превращается из жидкости в пар и поглощает определенное количество теплоты от объекта охлаждения. По техническим требованиям необходимо, чтобы хладагент имел постоянную и строго определенную температуру кипения t_0 , что достигается поддержанием в испарителе определенного и постоянного давления кипения p_0 . Кроме того, температура кипения хладагента должна быть ниже конечной температуры охлаждаемого объекта.

Пар, образующийся в результате кипения, отсасывается из испарителя компрессором. В теоретическом цикле считается, что из испарителя в компрессор поступает насыщенный пар. В действительности из испарителя может поступать влажный, насыщенный или перегретый пар, в зависимости от интенсивности теплопритоков к испарителю и количества находящегося в нем жидкого хладагента. Во всасывающем трубопроводе перед компрессором пар дополнительно перегревается за счет теплопритоков от окружающего воздуха и поступает в компрессор в перегретом состоянии. Перегрев пара перед компрессором несколько снижает эффективность работы установки, но является необходимой мерой для защиты компрессора от режима «влажного хода» и связанного с этим явлением гидроудара. В компрессоре пар сжимается, температура и давление его повышаются, и горячий пар высокого давления подается через нагнетательный трубопровод в конденсатор.

В конденсаторе пар хладагента в результате конденсации снова превращается в жидкость, при этом теплота от хладагента отводится водой или воздухом. Хладагент охлаждается до температуры насыщения и конденсируется при постоянных температуре t_k и давлении p_k конденсации.

В теоретическом цикле из конденсатора в редукционный вентиль поступает насыщенная жидкость. В действительном цикле в редукционный вентиль может поступать как насыщенная, так и переохлажденная жидкость, которая дополнительно переохлаждается либо в самом конденсаторе, либо в специальных аппаратах. В любом случае переохлаждение является положительным процессом, т.к. при этом увеличивается холодопроизводительность установки. Жидкость с высоким давлением в насыщенном или переохлажденном состоянии поступает к редукционному вентилю, где дросселируется от давления конденсации до давления кипения.

При дросселировании температура хладагента снижается до температуры кипения в испарителе за счет мгновенного испарения части жидкости. Теплота испарения отводится от остальной массы хладагента, температура которого снижается. Так как теплота отводится и передается внутри системы, без теплообмена с окружающей средой, то энтальпия хладагента в процессе дросселирования остается постоянной. Поскольку часть жидкости испаряется, то после редукционного вентиля хладагент представляет собой парожидкостную смесь (влажный пар). Парообразование при дросселировании называют **дроссельными потерями**, т.к. попадая затем вместе с жидкостью в испаритель, пар не производит в нем эффекта охлаждения. Редукционный вентиль предназначен

не только для дросселирования хладагента, но и для регулирования его подачи в испаритель.

Холодильную систему можно условно разделить на два участка, давления хладагента в которых разные. **Сторона высокого давления** начинается от нагнетательной полости компрессора, проходит через конденсатор и заканчивается в редукционном вентиле. Все трубопроводы и сосуды, находящиеся на этом участке установки, относятся к стороне высокого давления. Манометры, установленные на аппаратах и трубопроводах высокого давления, показывают давление конденсации (или давление нагнетания). **Сторона низкого давления** начинается от редукционного вентиля, проходит через испаритель и заканчивается во всасывающей полости компрессора. Все трубопроводы и сосуды, находящиеся в этой части системы, относятся к стороне низкого давления. Мановакуумметры, установленные на них, показывают давление кипения (или давление всасывания).

Для построения рабочего цикла в диаграмме обычно задаются конкретными параметрами, а именно:

- t_0 - температурой кипения;
- t_k – температурой конденсации;
- $t_{вс}$ – температурой всасывания;
- $t_{п}$ – температурой переохлаждения.

Этих параметров достаточно для построения на диаграмме полного цикла холодильной машины. Прежде всего следует определить по диаграмме давление кипения p_0 и давление конденсации p_k по соответствующим температурам t_0 и t_k и провести на диаграмме две горизонтальные прямые – изобары p_k и p_0 .

Пересечение изобары давления кипения p_0 с кривой насыщенного пара показывает состояние хладагента на выходе из испарителя (т. 1''). Перегрев пара во всасывающем трубопроводе перед компрессором происходит при p_0 до $t_{вс}$. Поэтому точка всасывания 1 лежит на пересечении изобары p_0 и изотермы $t_{вс}$ в области перегретого пара. При сжатии в компрессоре давление пара повышается до p_k , а сам процесс сжатия считается адиабатным, поэтому точка конца сжатия 2 лежит на пересечении адиабаты, проведенной из точки 1, и изобары p_k . Температуру этой точки называют температурой нагнетания компрессора. Из компрессора перегретый пар поступает в конденсатор, где сначала охлаждается до состояния насыщения (т. 2''), а затем конденсируется при $t_k = \text{const}$ до состояния насыщенной жидкости (т. 3'). Если в цикле имеет место переохлаждение жидкости, то состояние хладагента определяется в точке пересечения изобары p_k и изотермы $t_{п}$ в области переохлажденной жидкости (т. 3). Переохлажденная или насыщенная жидкость поступает в РВ и дросселируется до давления кипения p_0 при постоянной энтальпии $i = \text{const}$. Линии изохнтальп проходят вертикально, поэтому точку 4(5) – состояние перед испарителем – находят как пересечение вертикали, опущенной из т. 3(3') и изобары p_0 . В состоянии влажного пара 4(5) хладагент поступает в испаритель, где кипит при постоянных t и p кипения до состояния насыщенного пара (т. 1''). На этом цикл замыкается и повторяется.

Таким образом, действительный цикл холодильной машины состоит из отдельных, следующих друг за другом процессов:

1'' - 1 – перегрев пара на всасывании в компрессор при $p_0 = \text{const}$;

1 - 2 – адиабатное сжатие в компрессоре от p_0 до p_k при $s = \text{const}$;

2 - 2'' – сбив перегрева в конденсаторе при $p_k = \text{const}$;

2'' - 3' – конденсация пара в конденсаторе при $p_k = \text{const}$, $t_k = \text{const}$;

3' - 3 – переохлаждение жидкости в конденсаторе или ином аппарате при $p_k = \text{const}$;

3 - 4 – дросселирование в редукционном вентиле от p_k до p_0 при $i = \text{const}$;

4 - 1'' – кипение жидкости в испарителе при $p_0 = \text{const}$ и $t_0 = \text{const}$.

После построения цикла холодильной машины в диаграмме можно определить все термодинамические параметры каждой точки цикла.

Зная параметры узловых точек цикла, можно определить следующие показатели:

- удельную холодопроизводительность хладагента, кДж/кг $q_0 = i_{1''} - i_4$;

- удельную работу сжатия в компрессоре, кДж/кг $L = i_2 - i_1$;

- удельную тепловую нагрузку на конденсатор, кДж/кг $q_k = i_2 - i_{3(3')}$, в

зависимости от того, есть переохлаждение или нет;

- холодильный коэффициент цикла $\varepsilon = q_0/L = \frac{i_{1''} - i_4}{i_2 - i_1}$.

Для холодильных установок, работающих на хладагентах (фреонах) характерно наличие в схеме регенеративного теплообменника, в котором происходит теплообмен между жидкостью, поступающей из конденсатора к редукционному вентилу, и паром, поступающим из испарителя к компрессору. Проходя через теплообменник, холодный всасываемый пар поглощает теплоту от жидкости и перегревается, а жидкость при этом переохлаждается.

Изображение циклов работы паровой холодильной машины с теплообменником и без него в диаграмме $i - \ell g p$ аналогичны. Разница лишь в том, что процессы переохлаждения 3' - 3 и перегрева 1'' - 1 происходят в теплообменнике и, следовательно, $i_{3'} - i_3 = i_1 - i_{1''} \Rightarrow i_3 = i_{3'} + i_{1''} - i_1$.

Так как количество теплоты, отданное жидкостью, равно количеству теплоты, воспринятому паром, температура пара всегда повышается больше, чем снижается температура жидкости, поскольку удельная теплоемкость пара меньше.

Применение регенеративных теплообменников для аммиачных холодильных установок нецелесообразно, так как величина перегрева пара на всасывании в аммиачных компрессорах ограничена условиями их эксплуатации.

2.4.2. Многоступенчатая холодильная машина.

Для получения низких температур в охлаждаемых объектах необходимы низкие температуры кипения t_0 , то есть в испарителе приходится поддерживать

и низкое давление p_0 . Это приводит к увеличению значения отношения p_k / p_0 и к трем нежелательным явлениям:

- увеличению температуры нагнетания компрессора;
- возрастанию объемных потерь в компрессоре;
- увеличению дроссельных потерь в редукционном вентиле, что вызывает уменьшение холодопроизводительности установки.

Для современных быстроходных аммиачных поршневых компрессоров температура нагнетания хладагента не должна превышать 160°C , так как дальнейшее ее повышение приводит к нарушению нормальной смазки, вызывает пригорание масла и его самовозгорание. Снижение производительности компрессора при больших значениях отношения давлений p_k / p_0 связано с уменьшением коэффициента подачи. На основании опытных данных установлено, что при $p_k / p_0 > 8$ целесообразно применять многоступенчатое сжатие хладагента в двух (и более) последовательно соединенных цилиндрах или компрессорах. Для ограничения роста температуры нагнетания в результате последовательных сжатий (после каждой ступени сжатия) пар хладагента охлаждается либо водой в промежуточном холодильнике, либо кипящим хладагентом в специальном теплообменнике.

Наиболее распространенной двухступенчатой схемой является схема двухступенчатого сжатия со змеевиковым промежуточным сосудом и промежуточным охлаждением пара (рисунок 2.5).

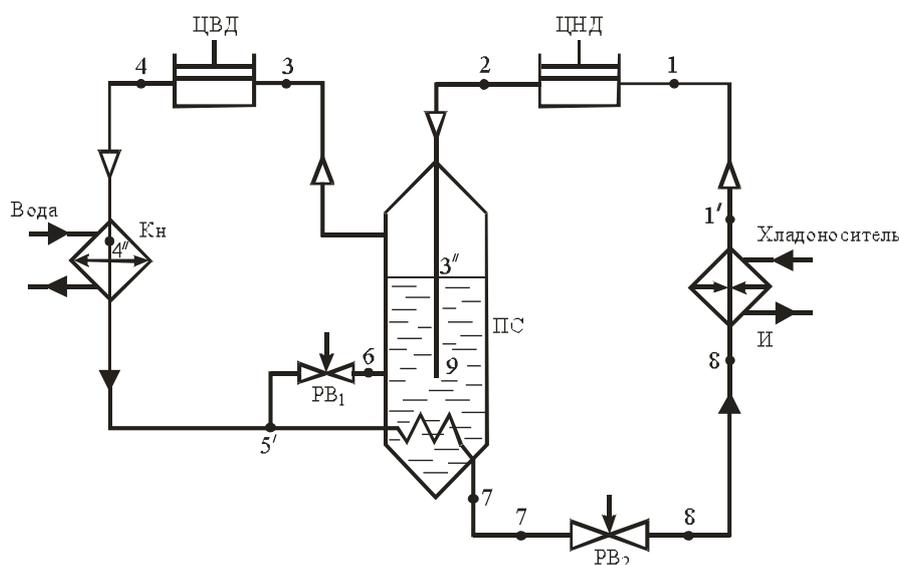


Рисунок 2.5 – Схема двухступенчатой холодильной машины со змеевиковым промежуточным сосудом и полным промежуточным охлаждением:

И - испаритель; ЦНД - цилиндр низкого давления; ПС - промежуточный сосуд; ЦВД - цилиндр высокого давления; Кн - конденсатор; РВ₁ и РВ₂ - редукционные вентили.

Пар хладагента после сжатия в цилиндре низкого давления (ЦНД) до промежуточного давления $p_{пр}$ поступает в промежуточный сосуд (ПС) ниже уровня кипящего хладагента и охлаждается до состояния насыщения, барботи-

руя через слой жидкости. Выходя из ПС, пар перегревается во всасывающем трубопроводе перед цилиндром высокого давления (ЦВД) и в перегретом состоянии поступает в него. Следует отметить, что даже в цикле с полным промежуточным охлаждением пар должен поступать в ЦВД (так же, как и в ЦНД) в перегретом состоянии, что является обязательным требованием техники безопасности. После сжатия в ЦВД до давления конденсации p_k , пар конденсируется в конденсаторе, после чего жидкость высокого давления разделяется на два потока (т.5' рисунки 2.5 и 2.6). Основной поток поступает в змеевик ПС, где переохлаждается, отдавая теплоту кипящему хладагенту, и в состоянии глубокого переохлаждения поступает через редукционный клапан $PВ_2$ в испаритель.

Другой поток жидкого хладагента дросселируется в $PВ_1$ от p_k до промежуточного давления $p_{пр}$ и поступает в промежуточный сосуд. Таким образом, в ПС происходит сбив перегрева пара между цилиндрами низкого и высокого давления, а также переохлаждение жидкости перед $PВ_2$ за счет кипения жидкого хладагента при $p_{пр}$.

Для анализа работы двухступенчатых схем и построения их цикла в диаграмме необходимо определить промежуточное давление $p_{пр}$. При минимальной работе цилиндров низкого и высокого давления определяют $p_{пр}$ из равенства отношений давлений в обеих ступенях сжатия по формуле:

$$p_{пр} = \sqrt{p_0 p_k} \quad (2.17)$$

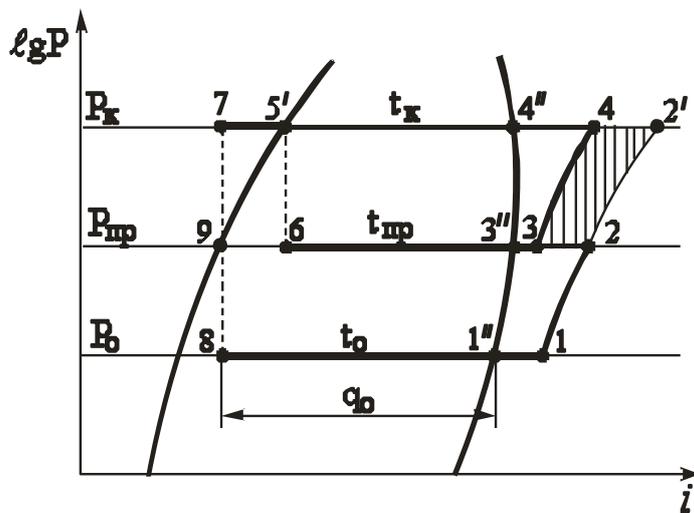


Рисунок 2.6 – Цикл двухступенчатой холодильной машины

На диаграмме (рисунок 2.6) обозначено:

- 1'' - 1 - перегрев пара на всасывании в ЦНД при $p_0 = \text{const}$;
- 1 - 2 - адиабатное сжатие в ЦНД от p_0 до $p_{пр}$;
- 2 - 3'' - сбив перегрева пара в ПС при $p_{пр} = \text{const}$;
- 3'' - 3 - перегрев пара на всасывании в ЦВД при $p_{пр} = \text{const}$;
- 3 - 4 - адиабатное сжатие в ЦВД от $p_{пр}$ до p_k ;
- 4 - 4'' - сбив перегрева пара в конденсаторе при $p_k = \text{const}$;
- 4'' - 5' - конденсация в конденсаторе при $p_k = \text{const}$ и $t_k = \text{const}$;
- 5' - 6 - дросселирование в $PВ_1$ от p_k до $p_{пр}$ при $i = \text{const}$;

6 - 3'' - кипение в ПС при $p_{пр} = \text{const}$ и $t_{пр} = \text{const}$;

5'-7 - переохлаждение жидкого хладагента в змеевике ПС при $p_k = \text{const}$;

7 - 8 - дросселирование в РВ₂ от p_k до p_0 при $i = \text{const}$;

8 - 1'' - кипение в испарителе при $p_0 = \text{const}$ и $t_0 = \text{const}$.

Массовая подача цилиндра высокого давления M_2 больше, чем цилиндра низкого давления M_1 , так как, кроме пара, поступающего из ЦНД в количестве M_1 , в него поступает еще и пар, образуемый при кипении жидкости в промежуточном сосуде. Объемная холодопроизводительность ЦВД меньше примерно в три раза из-за уменьшения объема пара при сжатии в ЦНД. Массовая подача ЦНД (в кг/с) определяется по формуле:

$$M_1 = Q_0/q_0, \quad (2.18)$$

где Q_0 - холодопроизводительность, кВт; q_0 - удельная холодопроизводительность, кДж/кг.

$$q_0 = i_{1''} - i_8. \quad (2.19)$$

Массовая подача ЦВД (в кг/с) находится из соотношения:

$$M_2 = M_1(i_2 - i_7)/(i_3 - i_6). \quad (2.20)$$

Удельная работа сжатия ЦНД (в кДж/кг) равна:

$$L_1 = i_2 - i_1; \quad (2.21)$$

удельная работа сжатия ЦВД (в кДж/кг):

$$L_2 = i_4 - i_3; \quad (2.22)$$

удельная нагрузка на конденсатор (в кДж/кг):

$$q_k = i_4 - i_5; \quad (2.23)$$

холодильный коэффициент равен:

$$\varepsilon = q_0 / (L_1 + L_2). \quad (2.24)$$

Через разные элементы многоступенчатых схем с промежуточным отбором пара циркулирует неодинаковое количество вещества. Следовательно, изображение процессов в многоступенчатых холодильных установках на термодинамических диаграммах носит условный характер, так как каждый процесс на таких диаграммах относится к изменению состояния 1 кг вещества. Поэтому массовые потоки в элементах многоступенчатых машин при их расчете относят к 1 кг рабочего тела, проходящего через низкотемпературный испаритель.

Для получения очень низких температур применение одного рабочего тела оказывается невозможным из-за давлений кипения рабочего тела, близких к глубокому вакууму, затвердевания его при низкой температуре кипения в испарителе и по другим причинам. В этих случаях приходится использовать каскадные холодильные машины, в каждой ступени которых применяют свое рабочее тело. При этом испаритель каждой следующей ступени является конденсатором предыдущей. Холодильный коэффициент цикла холодильной машины (2.16), называемый теоретическим, составляет примерно 80% холодильного коэффициента идеального цикла Карно при тех же значениях T_k и T_0 .

Холодильный коэффициент реального цикла холодильной машины, в свою очередь, меньше теоретического из-за объемных и энергетических потерь.

Производительность компрессора холодильной машины должна обеспечивать отсасывание пара из испарителя с той же интенсивностью, с которой он

образуется в результате кипения жидкого хладагента. Если хладагент кипит быстрее, чем компрессор может отводить пар, то избыточное количество пара накапливается в испарителе, давление увеличивается, и в результате повышается температура кипения.

Температура кипения хладагента в испарителе является главным фактором, влияющим на производительность компрессора. Если она повышается при постоянной температуре конденсации, то степень сжатия p_k/p_0 уменьшается, коэффициент подачи компрессора возрастает и производительность компрессора увеличивается.

Если производительность компрессора такая, что пар отводится из испарителя слишком быстро, то давление в испарителе уменьшается, температура кипения снижается и увеличивается удельный объем хладагента. Все это приводит к уменьшению холодопроизводительности компрессора. При повышении температуры конденсации при постоянной температуре кипения степень сжатия p_k/p_0 увеличивается, коэффициент подачи компрессора снижается. В результате действительный объем перемещаемого компрессором пара в единицу времени уменьшается и холодопроизводительность компрессора снижается (см. п. 3.2.1.2).

Паровые компрессионные холодильные машины входят в состав холодильных установок. Схемы холодильных установок, помимо холодильных машин, включают также системы охлаждения объекта, например, холодильника, рефрижераторного поезда и т.д.

Системой охлаждения называют ту часть холодильной установки, которая располагается между редуционным вентилем и всасывающим патрубком компрессора. Назначение этой системы – поддержание заданного температурно-влажностного режима охлаждаемого объекта.

По способу подачи рабочего тела к потребителям холода, а также по способу отвода теплоты от них различают системы непосредственного охлаждения (безнасосные и насосные) и системы с промежуточным хладоносителем.

В безнасосной системе непосредственного охлаждения хладагент поступает в охлаждающие приборы от редуционного вентиля с отбором паров из них компрессором.

Жидкий хладагент циркулирует за счет разности давлений конденсации и испарения.

В насосной системе циркуляция жидкого хладагента в низкотемпературном контуре осуществляется с помощью насоса. В этом случае в схему вводится емкость (ресивер), в которой находится определенный объем хладагента. Такие системы называют насосно-циркуляционными.

В системах с промежуточным хладоносителем в охлаждающих приборах циркулирует жидкий хладоноситель, который охлаждается хладагентом в испарителе холодильной машины.

В зависимости от способа отвода теплоты от потребителя холода и конструкции охлаждающих приборов различают системы батарейного (панельного), воздушного, смешанного и контактного охлаждения.

В батареях (панелях) теплообмен происходит при переходе теплоты при естественной конвекции от охлаждаемого тела к воздуху, а затем от воздуха через тонкие стенки охлаждающих приборов – к хладагенту или хладоносителю.

В воздушных системах охлаждения движение воздуха осуществляется принудительно, благодаря чему скорость перемещения воздуха по сравнению со скоростью при естественной конвекции возрастает в 10...20 раз. В смешанных системах сочетаются батарейное и воздушное охлаждение.

При контактном охлаждении отвод теплоты от потребителя холода осуществляется при непосредственном контакте с ним охлаждающего прибора.

2.5. Холодильные агенты и хладоносители

2.5.1. Общие сведения

Хладагент должен обладать определенными физико-химическими, термодинамическими и теплофизическими свойствами, от которых зависят конструкция холодильной машины и расход энергии.

При нормативном атмосферном давлении 0,1 МПа хладагент должен иметь достаточно низкую температуру кипения, чтобы при работе холодильной машины не было разрежения в испарителе.

Хладагенты используют в холодильных, теплонасосных установках и установках кондиционирования воздуха. Основными хладагентами являются вода, аммиак, хладоны и воздух.

Воду применяют главным образом в установках кондиционирования воздуха, где обычно температура теплоносителя $t_n > 0^{\circ}\text{C}$. В качестве хладагента воду используют в установках абсорбционного и эжекторного типов.

Основные требования, предъявляемые хладагентам парокомпрессионных установок:

1. Интервал температур, в котором осуществляется цикл, должен лежать между критической и тройной точками этого вещества (т.е. чтобы в этом интервале температур мог существовать влажный пар).

2. Необходимо, чтобы в этом интервале температур давление насыщенных паров хладагента было, с одной стороны, не слишком низким (это потребовало бы применения глубокого вакуума и тем самым существенно усложнило бы ее), а с другой стороны, не слишком высоким (это тоже привело бы к усложнению установки).

Верхняя температура цикла парокомпрессионной установки примерно одинакова для циклов, осуществляемых с различными веществами, так как она определяется значением температуры охлаждающей среды в конденсаторе (в среднем $\approx 20^{\circ}\text{C}$). В соответствии с этим значением принимают верхнюю температуру цикла на 5...10 $^{\circ}\text{C}$ выше.

Нижняя температура цикла задается заранее в зависимости от назначения холодильной установки. Парокомпрессионные установки применяются для получения и поддержания в охлаждаемом объеме температур в диапазоне 0...-120 $^{\circ}\text{C}$. Поэтому выбор хладагента определяется интервалом температур, в котором работает установка.

Желательно, чтобы при нижней температуре цикла давление насыщенных паров хладагента было близко к атмосферному, это позволило бы упростить установку.

Наиболее широко распространенными хладагентами являются аммиак и хладоны.

Аммиак имеет малый удельный объем при температурах кипения $t > -70^{\circ}\text{C}$, большую теплоту парообразования, небольшую растворимость в масле и другие преимущества. Его применяют в поршневых компрессорных и абсорбционных установках. К недостаткам аммиака следует отнести ядовитость, горючесть, взрывоопасность при концентрациях его в воздухе 16...26,8%.

Хладоны (фреоны) химически инертны, мало- или невзрывоопасны. Хладоны – галоидопроизводные предельных углеводородов, получаемые путем замены атомов водорода в насыщенном углеводороде $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ атомами фтора, хлора, брома ($\text{C}_n\text{H}_x\text{F}_y\text{Cl}_z\text{Br}_u$). Числа молекул отдельных составляющих, входящих в химические соединения хладонов, связаны зависимостью $x + y + z + u = 2n + 2$. Обозначение любого хладагента RN, где R - символ, указывающий хладагент, от Refrigerant (хладагент), N - номер хладона или присвоенный номер для других хладагентов. Для хладонов номер расшифровывается следующим образом.

Первая цифра в двузначном номере или первые две цифры в трехзначном номере обозначают насыщенный углеводород $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$, на базе которого получен хладон. 1 – CH_4 (метан); 11 – C_2H_6 (этан); 21 – C_3H_8 (пропан); 31 – C_4H_{10} (бутан). Справа указывают число атомов фтора в хладоне: CFCl_3 – R11, CF_2Cl_2 – R12, $\text{C}_3\text{F}_4\text{Cl}_4$ – R214, CCl_4 – R10. При наличии в хладоне незамещенных атомов водорода число их добавляют к числу десятков номера: CHFCl_2 – R21, CHF_2Cl – R22. При наличии в хладоне атомов брома после основного номера пишут букву B, а за ней - число атомов брома: CF_2Br_2 – R12B2.

В качестве рабочих тел могут использоваться азеотропные смеси (т.е. такая, в которой при кипении и конденсации массовая доля компонентов практически не изменяется), составляемые из двух хладагентов. Например, азеотропную смесь, состоящую из 48,8% R22 по массе и 51,2% R115 ($\text{C}_2\text{F}_5\text{Cl}$), называют хладоном R502, его температура кипения при давлении 0,1 МПа $-45,6^{\circ}\text{C}$.

В обозначении смесей хладагентов указывают названия составляющих и их массовые доли. Хладон 502 можно обозначить R22/R115 (48,8/51,2). Цифрами, начиная с 500, условно обозначают азеотропные смеси.

Хладагентам неорганического происхождения (аммиак, вода) присваивают номера, равные их молекулярной массе, увеличенной на 700. Так, аммиак и воду обозначают соответственно R717 и R718.

2.5.2. Теплофизические, физико-химические и физиологические свойства хладагентов

Теплофизические свойства – это вязкость μ , теплопроводность λ , плотность ρ и др. Они, как и теплота парообразования r , оказывают влияние на ко-

эффицент теплоотдачи при кипении и конденсации. Большим значениям ρ , λ , γ и малой вязкости μ соответствуют большие значения коэффициентов теплоотдачи.

На гидравлическое сопротивление при циркуляции хладагента в системе влияют вязкость и плотность: чем они больше, тем больше сопротивление. Количество циркулирующего в системе хладагента уменьшается с ростом теплоты парообразования.

К физико-химическим свойствам относятся растворимость хладагентов в смазочных маслах и воде, инертность к металлам, взрывоопасность и воспламеняемость. При ограниченной растворимости хладагентов в масле в жидкой фазе смеси наблюдаются два слоя, из которых в одном преобладает масло, в другом хладагент. К таким хладагентам относятся аммиак R717, углекислота R744 и ограниченно растворимые хладоны R13, R14, R115.

К хладагентам с неограниченной растворимостью относятся R11, R12, R21. В этом случае для смеси хладона и масла требуется поддержание более низкого давления кипения, поэтому на сжатие пара затрачивается излишняя работа. Хладоны R22 и R114 составляют промежуточную группу.

Аммиак неограниченно растворяет воду. При небольшом количестве воды в нем работа холодильной машины заметно не нарушается. Хладоны почти не растворяют воду.

Избыточная влага в хладоне при прохождении через дроссель превращается в лед (если $t_0 < 0^\circ\text{C}$) и "запаивает" дроссельное отверстие. По этой причине холодильные машины имеют специальные осушительные устройства.

Хладоны при отсутствии влаги в области применяемых в холодильной технике температур на металлы не действуют.

Аммиак не оказывает коррозийного действия на сталь. В присутствии воды он разъедает медь, цинк, бронзу и другие медные сплавы, за исключением фосфористой бронзы.

Физиологические свойства. Хладоны R11, R12, R13, R22 невзрывоопасны. Хладоны с большим содержанием атомов фтора или полностью фторированные (R13, R113) практически безвредны для человека. Хладон R12 на открытом пламени разлагается, и в продуктах его разложения содержатся ядовитый фосген и вредные для человека фтористый и хлористый водород.

2.5.3. Области применения хладагентов

Аммиак, хладоны R12 и R22 используют в компрессионных холодильных машинах для получения температур кипения $-30\dots-40^\circ\text{C}$ без вакуума в системе охлаждения. Хладон R12 применяют в одноступенчатых холодильных машинах с температурой конденсации не более 75°C и температуре кипения не ниже -30°C , в бытовых холодильниках, кондиционерах, водоохлаждающих холодильных машинах. Хладон R22 используют в машинах с поршневыми и винтовыми компрессорами одно- и двухступенчатого сжатия, а также в бытовых холодильниках. Диапазон температур кипения от 10 до -70°C при температуре

конденсации не выше 50°C . Одноступенчатое сжатие рекомендуется до температур кипения не ниже -35°C .

Хладагент R502 применяют в низкотемпературных одноступенчатых холодильных машинах при температуре конденсации до 50°C и температурах кипения до -45°C .

Появившиеся в 30-е годы XX века галогенизированные хладагенты получили широкое распространение. Однако в ходе исследований "озоновых дыр" (значительного уменьшения содержания озона на высоте 20...25 км в земной атмосфере) было установлено, что промышленные и бытовые отходы, содержащие атомы хлора, в том числе хладоны, достигая атмосферы, высвобождают хлор, который участвует в разрушении озонового слоя. Известно, что озоновый экран (среднее содержание озона в атмосфере 0,001%) защищает поверхность Земли от жесткого ультрафиолетового излучения. Поэтому Международной конвенцией в Вене в 1985 г., Протоколом в Монреале в 1987 г. и последующими протоколами с участием представителей крупнейших стран мира были приняты решения о прекращении к 2000 г. производства и использования озоноопасных хладонов, в первую очередь R11, R12, R113, R114, R115. Хладагенты R22, R123, R124, R141, R142 разрешены в качестве переходных для замены запрещаемых. Но и они должны быть исключены из пользования к 2040 г., а по возможности - и к более раннему сроку (2020 г.).

Взамен вышеперечисленных хладонов предлагаются гидрофторуглероды (ГФУ) и гидрохлорфторуглероды (ГХФУ), которые благодаря содержанию водорода разлагаются гораздо быстрее, чем хлорфторуглероды, в нижних слоях атмосферы, не достигая озонового слоя. На мировом рынке такие озонобезопасные хладоны предлагает, например, под торговой маркой "СУВА" фирма "Дюпон" (США). "Дюпон" поставляет на рынок хладагент HP62 (R404a), имеющий при давлении 0,1 МПа температуру кипения порядка -46°C , гидрофторуглерод R134a (CH_2FCF_3) и др. В России также освоен выпуск R134a. Он может полностью заменить R12, хотя при использовании его несколько снижаются удельная холодопроизводительность установки (92% от удельной холодопроизводительности R12), холодильный коэффициент (98% по сравнению с R12), увеличивается соотношение давлений конденсации и кипения (123%, если принять это отношение для R12 за 100%). В настоящее время для R134a подобраны и синтетические масла (ХС - 22, ХФС - 134). Температура кипения R134a при давлении 0,1 МПа составляет $-26,5^{\circ}\text{C}$.

Разработаны заменители и для других хладонов. Так, альтернативным для R22 может быть R407C или R290. Хладагент R407C представляет собой смесь R32/125/134a в соотношениях 23/25/52%. Хладон 502 может быть заменен на R125 (CHF_2CF_3), имеющий температуру кипения $-48,5^{\circ}\text{C}$. Для низкотемпературных машин (каскадных) может быть рекомендован озонобезопасный R23.

Расширяется использование и аммиака, не влияющего на окружающую среду. Аммиак в два раза легче воздуха и при утечке быстро поднимается в атмосферу, где разлагается в течение нескольких дней. При выбросе жидкий аммиак почти немедленно испаряется. Но следует иметь в виду, что он ядовит, горюч и взрывоопасен. Если ранее аммиак использовали преимущественно в

крупных по холодопроизводительности холодильных машинах, то теперь промышленность осваивает конструкции средних и малых аммиачных компрессоров и холодильного оборудования на их основе.

Хладоносители подразделяются на жидкие и твердые. К жидким относятся водные растворы солей - рассолы и однокомпонентные вещества, замерзающие при низких температурах (этиленгликоль, кремнийорганическая жидкость). Применяют водные растворы солей NaCl , MgCl_2 , CaCl_2 , температура замерзания которых до известного предела (состояния криогидратной точки) зависит от концентрации рассола. Для раствора NaCl криогидратная точка $-21,2^{\circ}\text{C}$, для MgCl_2 $-33,6^{\circ}\text{C}$, для CaCl_2 -55°C . Для уменьшения коррозирующего действия рассолов на металлические части оборудования в них добавляют пассиваторы: силикат натрия, хромовую соль, фосфорные кислоты.

Этиленгликоль в зависимости от концентрации в воде может иметь температуру замерзания от 0°C (вода) до $-67,2^{\circ}\text{C}$ при концентрации 70% по объему.

Твердые хладоносители – это эвтектический лед, образующийся при криогидратной температуре, представляющий собой смесь льда и соли и имеющий постоянную температуру плавления.

Контрольные вопросы

1. Каков принцип работы парокompрессионной машины?
2. Чем отличается теоретический цикл холодильной машины от действительного?
3. Какие процессы протекают в компрессоре, конденсаторе, испарителе?
4. Для чего необходимы перегрев пара хладагента перед компрессором и переохлаждение жидкого хладагента перед испарителем?
5. Что такое дроссельные потери?
6. Какой параметр хладагента не изменяется при дросселировании?
7. Какими параметрами задаются при построении рабочего цикла в диаграмме?
8. Чем вызвана необходимость применения многоступенчатых холодильных машин?
9. Объясните принцип работы двухступенчатой холодильной машины.
10. Какие требования предъявляют к хладагентам?
11. Что такое тройная и критическая точки?
12. Как расшифровывается номер хладагента?
13. Что такое азеотропные смеси?
14. Что относится к теплофизическим свойствам хладагентов?
15. Что относится к физико-химическим свойствам хладагентов?
16. Назовите наиболее распространенные хладоносители.

3. ХОЛОДИЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

3.1. Типы холодильных машин

Холодильной машиной называют комплект оборудования, необходимого для осуществления холодильного цикла.

В зависимости от вида физического процесса, в результате которого получают холод, холодильные машины подразделяют на следующие типы:

- 1) использующие фазовый переход рабочего тела из жидкого в газообразное состояние (компрессионные паровые, абсорбционные, сорбционные, парожетторные);
- 2) использующие процесс расширения воздуха (газовые, вихревые).

В зависимости от вида используемой энергии различают холодильные машины:

- 1) использующие механическую энергию (компрессионные паровые, газовые);
- 2) теплоиспользующие (парожетторные, абсорбционные и сорбционные).

К холодильным машинам можно также отнести воздушные детандерные, использующие процесс расширения воздуха с производством внешней работы, и безмашинные термоэлектрические, использующие непосредственно электроэнергию на основе эффекта Пельтье. Холодильные машины подразделяют и по другим типам.

3.1.1. Газовые холодильные машины

В газовых холодильных машинах хладагентом являются газообразные вещества, агрегатное состояние которых не изменяется при совершении цикла.

Хладагентом в таких машинах является в основном воздух, поэтому их называют воздушными холодильными машинами.

Первые воздушные холодильные машины появились около 100 лет назад. Однако тогда они не получили широкого распространения и были вытеснены с рынка парокомпрессионными, так как удельная массовая холодопроизводительность воздуха значительно меньше, чем кипящего хладагента в цикле паровой холодильной машины. При использовании воздушных холодильных машин требуется большая массовая подача хладагента, поэтому только по мере развития газотурбинной и особенно турбореактивной техники удалось создать воздушные турбохолодильные машины, близкие по экономичности в области относительно низких температур (от -80 до -120°C) к парокомпрессионным. Идеальный цикл воздушной холодильной машины в Ts - диаграмме и ее функциональная схема представлены на рисунке 3.1.

Воздух в компрессоре адиабатически сжимается от давления p_1 до p_2 (линия 1-2), нагреваясь при этом от температуры T_1 , равной температуре охлаждаемого тела T_0 до T_2 . На участке (2-3) он отдает поглощенную теплоту внешней среде, например, воде. После этого воздух адиабатически расширяется в детандере Д от давления p_2 до p_1 (3-4), совершая полезную работу, и поступает в охлаждаемый объем Об, где нагревается от температуры T_4 до T_1 (4-1), отводя

теплоту от охлаждаемого тела. Из охлаждаемого объема воздух поступает в компрессор, и цикл повторяется.

Если допустить, что воздух является идеальным газом, т.е. $c_p = \text{const}$, и представить для адиабатных процессов сжатия и расширения воздуха отношение температур в виде:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}, \quad (3.1)$$

где κ - показатель адиабаты,

то холодильный коэффициент цикла ε можно записать:

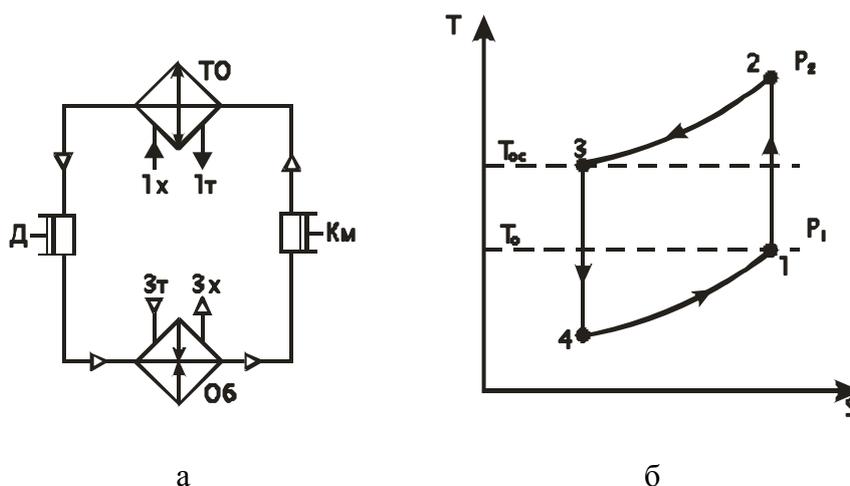


Рисунок 3.1 – Функциональная схема воздушной холодильной машины и цикл ее работы:

а - схема машины, б - диаграмма работы машины.

$$\varepsilon = \frac{T_1}{T_2 - T_1} = \frac{T_4}{T_3 - T_4}. \quad (3.2)$$

Коэффициент обратимости цикла равен

$$\eta = \varepsilon / \varepsilon^{\text{обр}}, \quad (3.3)$$

где $\varepsilon^{\text{обр}}$ - холодильный коэффициент обратимого цикла Карно.

Цикл воздушной холодильной машины имеет большие необратимые потери, поэтому термодинамически он целесообразен, если воздушная холодильная машина осуществляет комбинированный цикл, охлаждая и нагревая одновременно. В воздушных холодильных машинах типа ТХМ охлаждение происходит благодаря расширению воздуха в расширительной машине - детандере с производством внешней полезной работы. Такие машины имеют холодопроизводительность 30, 60 кВт и более и используются для быстрого замораживания эндокринного сырья (железы животных, используемые в медицине), некоторых видов продуктов растительного происхождения (плодов, овощей, ягод), кулинарных изделий.

Вихревая труба представляет собой цилиндрическую трубу, разделенную диафрагмой на холодную и горячую части.

С термодинамической точки зрения процессы, протекающие в вихревой трубе, сводятся к тому, что слои воздуха, вращающиеся вблизи оси, отдают кинетическую энергию остальной (периферийной) массе воздуха и при этом охлаждаются. Другая же часть воздуха воспринимает эту энергию и нагревается в результате трения, на преодоление которого затрачивается значительная часть кинетической энергии.

Термодинамическое совершенство воздушных холодильных машин вихревого типа не превышает нескольких процентов и зависит от использования теплоты потока воздуха, выходящего из горячей части вихревой трубы. Если эта теплота утилизируется, то общая эффективность повышается. Вихревые трубы просты в изготовлении и эксплуатации, компактны и надежны. Однако область их использования ограничена вследствие низкой экономичности их термодинамических процессов.

3.1.2. Компрессионные паровые холодильные машины

подавляющее большинство действующих холодильных машин представляют собой парокompрессионные машины, которые в зависимости от типа используемого компрессора подразделяют на:

- поршневые;
- ротационные;
- винтовые;
- центробежные;
- спиральные.

Для обеспечения требуемых температур кипения и конденсации рабочего тела используют одноступенчатые, многоступенчатые и каскадные компрессионные паровые машины.

Функциональные схемы паровой одноступенчатой холодильной машины с детандером и дросселем и их циклы, а также принципиальная схема многоступенчатых парокompрессионных машин и их циклы были рассмотрены выше (см. п. 2.4).

Для реализации цикла в комплект парокompрессионной холодильной машины входят компрессор, конденсатор, испаритель, теплообменник, приборы автоматики, пускозащитная электроаппаратура, монтажные трубопроводы и другие элементы.

Наиболее широко распространены ***парокompрессионные холодильные машины с поршневыми компрессорами***, обладающие наиболее высокими (по сравнению с машинами других типов) энергетическими коэффициентами, способностью работать при более высоком отношении давлений конденсации и кипения. Однако они менее надежны, чем машины с центробежными и винтовыми компрессорами. Эти машины средней холодопроизводительности используют в рассольных системах охлаждения, но их можно применять и в сис-

теме непосредственного охлаждения, так же, как и машины малой холодопроизводительности.

Холодильные машины с центробежными компрессорами имеют низкую энергетическую эффективность при небольшой холодопроизводительности (менее 700 кВт), поэтому они используются при больших значениях холодопроизводительности.

Холодильные машины с винтовыми маслозаполненными компрессорами характеризуются высокой надежностью, удовлетворительными энергетическими показателями при производительности, превосходящей верхний предел эффективного использования холодильных машин с поршневыми компрессорами. Несмотря на основной недостаток – наличие металлоемкой масляной системы – холодильные машины с винтовыми компрессорами получили в последние годы широкое распространение.

Холодильные машины с ротационными пластинчатыми компрессорами отличаются простотой устройства, изготовления и эксплуатации, большей уравновешенностью, чем поршневые, так как в них нет деталей, совершающих возвратно-поступательное движение, нечувствительностью компрессора к гидравлическим ударам. Однако они имеют недостатки: значительные потери на трение, повышенный шум. При холодопроизводительности от нескольких сотен ватт до нескольких киловатт их показатели сравнимы с показателями холодильных машин с поршневыми компрессорами.

Холодильные машины со спиральными компрессорами характеризуются высокой уравновешенностью, так как вместо возвратно-поступательного движения поршня спираль совершает планетарное движение. Отсутствие клапанов повышает эффективность компрессора, снижает потери производительности, уровень шума и вибраций. Сокращение рабочих поверхностей трения позволяет повысить надежность, моторесурс и срок службы компрессора.

3.1.3. Абсорбционные и сорбционные холодильные машины

Абсорбционные и сорбционные холодильные машины отличаются от компрессионных тем, что в них отвод теплоты от охлаждаемого объема к окружающей среде осуществляется путем затраты внешней энергии в виде теплоты, а не работы. В системе абсорбционной холодильной машины циркулирует рабочее тело, представляющее собой бинарный раствор веществ, имеющих различные нормальные температуры кипения.

Низкокипящее вещество выполняет роль хладагента, а высококипящее вещество – абсорбента.

Абсорбция – избирательное поглощение газов или паров жидким поглотителем (абсорбентом). Этот процесс представляет собой переход вещества из газовой (или паровой) фазы в жидкую. Процесс, обратный абсорбции, т.е. выделение растворенного газа из жидкости, называют *десорбцией*.

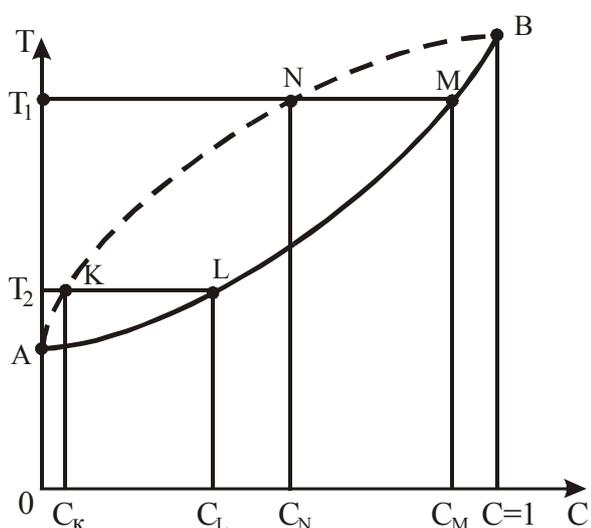
В отличие от чистых веществ растворы обладают способностью абсорбировать пар раствора одного состава жидким раствором другого состава даже в

том случае, когда температура жидкости выше температуры пара. Именно это свойство раствора и используется в абсорбционных холодильных установках.

Температура кипения бинарного раствора при $p = \text{const}$ зависит от состава раствора. При этом температура кипения будет тем выше, чем больше в растворе доля компонента с более высокой температурой кипения. Зависимость температуры кипения бинарного раствора при $p = \text{const}$ от состава раствора изображается кривой кипения в ТС-диаграмме, представленной на рисунке 3.2 (здесь C – массовая доля высококипящего компонента, T – абсолютная температура).

Характерной особенностью растворов является то, что пар, получающийся при кипении раствора, имеет иной состав, чем находящийся с ним в равновесии жидкий раствор. Пар более богат низкокипящим компонентом.

При температуре T_1 в равновесии с жидким раствором состава C_M находится



пар состава C_N , а при T_2 жидкому раствору состава C_L соответствует пар состава C_K . Если теперь пар состава C_K , имеющий температуру T_2 , привести в соприкосновение с жидким раствором состава C_M при T_1 , по отношению к которому пар состава C_K является переохлажденным, то очевидно, что пар будет конденсироваться (абсорбироваться жидким раствором). Давление жидкости и пара будет в этом процессе одно и то же.

Рисунок 3.2 – ТС-диаграмма для бинарного раствора:

сплошная линия - кривая кипения; штриховая - кривая пара, т.е. линия составов пара, находящегося в равновесии с жидкостью.

Теплота парообразования, выделяющаяся в процессе абсорбции при температуре T_1 , отводится из раствора. Получается раствор состава $C_L < C < C_M$.

В качестве одного из возможных хладагентов в абсорбционной холодильной установке (рис. 3.3) используется влажный пар аммиака.

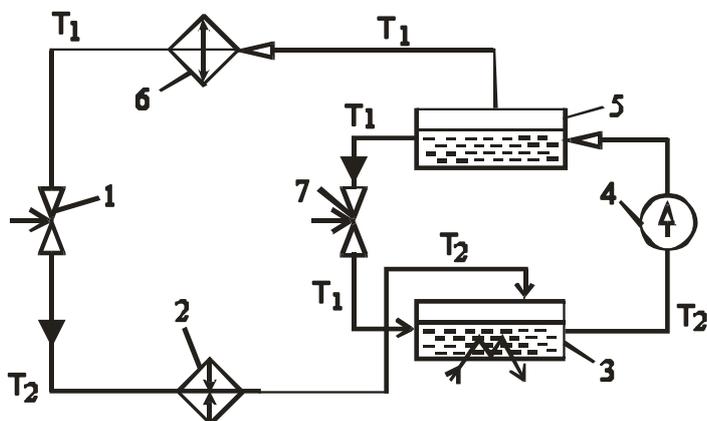


Рисунок 3.3 – Схема абсорбционной холодильной установки:

1, 7 - редукционный (дроссельный) вентиль; 2 - испаритель; 3 - абсорбер; 4 - насос; 5 - парогенератор; 6 - конденсатор.

Жидкий насыщенный аммиак, дросселируясь в редукционном вентиле 1 от давления p_1 до p_2 , охлаждается от температуры T_1 до T_2 . Затем влажный пар аммиака поступает в испаритель 2, где степень сухости пара увеличивается до значения $x = 1$ за счет притока теплоты q_2 от охлаждаемого объема. Сухой насыщенный пар аммиака при температуре T_2 поступает в абсорбер 3, куда подается также раствор аммиака в воде, имеющий температуру T_1 . Поскольку при одном и том же давлении вода кипит при значительно более высокой температуре, чем аммиак, то именно он является легкокипящим компонентом. Этот раствор абсорбирует пар аммиака. Теплота абсорбции $q_{абс}$, выделяющаяся при этом, отводится охлаждающей водой. Концентрация аммиака в растворе в процессе абсорбции увеличивается, и, следовательно, из абсорбера выходит обогащенный раствор (при T_2 и p_2). С помощью насоса 4, повышающего давление этого обогащенного раствора от p_2 до p_1 , раствор подается в генератор аммиачного пара 5, где за счет теплоты $q_{пг}$, подводимой к раствору от внешнего источника, происходит испарение раствора. Выделяющийся при этом пар значительно более богат аммиаком, чем раствор, из которого он получается. Практически из раствора выделяется почти чистый аммиачный пар, так как парциальное давление водяного пара в газовой фазе при данных температурах ничтожно мало. Этот аммиачный пар при температуре T_1 и давлении p_1 поступает затем в конденсатор 6, где он конденсируется, и жидкий аммиак в состоянии насыщения направляется в редукционный вентиль 1.

В выходящем из парогенератора растворе содержание аммиака значительно снизилось в результате выпаривания. Этот бедный аммиаком раствор дросселируется в редукционном вентиле 7 от давления p_1 до p_2 и затем поступает в абсорбер, где он обогащается аммиаком за счет абсорбируемого аммиачного пара.

Из схемы видно, что абсорбционный узел этой установки, состоящий из абсорбера, парогенератора, насоса и редукционного вентиля 7, служит в конечном итоге для сжатия аммиачного пара от давления p_2 на выходе из испарителя до давления p_1 на входе в конденсатор.

Преимущество данного способа сжатия заключается в том, что если в парокомпрессионной холодильной установке на сжатие пара затрачивается значительная работа, то здесь насос повышает давление водоаммиачного раствора, причем затрата работы на привод насоса пренебрежимо мала по сравнению с затратой работы в компрессоре, да и сам насос компактен и конструктивно прост. Однако, в определенной степени, выигрыш в работе, затрачиваемой на привод компрессора, компенсируется затратой теплоты в парогенераторе. Эта теплота отводится затем охлаждающей водой в абсорбере, так что $q_{абс} = q_{пг}$ (без учета работы насоса).

Коэффициент теплоиспользования абсорбционной холодильной установки:

$$\xi = q_2 / q_{пг}, \quad (3.4)$$

где q_2 - теплота, отводимая из охлаждаемого объема;

$q_{пг}$ - теплота, подводимая в парогенераторе.

Другим бинарным раствором, часто используемым в абсорбционных установках, является вода - бромистый литий. Причем в данном случае хладагентом служит вода. Водоаммиачные холодильные машины используют для получения относительно низких температур (до -70°C), а бромистолитиевые - более высоких.

Теплоиспользующие абсорбционные холодильные машины перспективны с точки зрения экономии топливно-энергетических ресурсов, поскольку эти машины позволяют использовать вторичные ресурсы (отходящие газы, отработанный пар, горячая вода), теплоту ТЭЦ в неотапительный период. С точки зрения экологии также есть положительные моменты: эти машины позволяют избежать применения в качестве хладагентов хлорфторуглеродов, отрицательно воздействующих на озоновый слой атмосферы, а также выбросов машинного масла в окружающую среду.

Однако абсорбционные холодильные машины работают при температуре греющего источника $70\dots 180^{\circ}\text{C}$ (чаще $115\dots 180^{\circ}\text{C}$), поэтому диапазон до 70°C является нереализуемым и соответствующая теплота часто просто сбрасывается в атмосферу. В этом диапазоне могут работать сорбционные холодильные машины, к которым подводится теплота низкого уровня температур, а запасы тепловой энергии в указанном температурном диапазоне огромны.

В сорбционных холодильных машинах используют рабочие смеси, обладающие не только эффектом **сорбции** (сорбция – поглощение твердым телом или жидкостью какого-либо вещества из окружающей среды), но и эффектом **полной взаимной растворимости компонентов**. Сорбционные холодильные машины (СХМ) не имеют конкурентов в выработке холода от теплоты низкого потенциала, начиная с температуры, превышающей всего на $10\dots 15^{\circ}\text{C}$ температуру среды, охлаждающей конденсатор. Рабочими веществами таких машин могут быть ацетон (50%) и пропанобутановая смесь техническая зимняя (50%), а также водные растворы роданида аммония и др. С помощью СХМ возможно получение холода на уровне -30°C при тепловом коэффициенте от 5 до 10%, а в дальнейшем и выше.

Область применения СХМ – бытовые холодильники и кондиционеры, автомобильный транспорт, выбрасывающий в окружающую среду большое количество теплоты на уровне температур выше 70°C .

В бытовых холодильниках и кондиционерах может быть использована энергия солнечного излучения, полученная с помощью солнечных коллекторов. СХМ, установленные на холодильниках агропромышленного комплекса и торговли, позволяют дополнительно вырабатывать холод за счет использования теплоты перегрева паров хладагента и теплоты охлаждающего масла винтовых компрессоров.

Холодопроизводительность СХМ составляет порядка 1кВт.

3.1.4. Пароэжекторные холодильные машины

Пароэжекторные холодильные машины относятся к группе теплоиспользующих. В качестве рабочих тел в пароэжекторных машинах могут быть ис-

пользованы вода, аммиак и хладоны. Однако практически применяют чаще всего пароводяные эжекторные холодильные машины, в которых рабочим телом и одновременно хладоносителем служит вода.

Принцип действия эжектора. Эжекторами называют аппараты, предназначенные для получения газа или пара повышенного давления путем смешения двух потоков (рисунок 3.4).

Сжимаемый газ или пар с давлением p_2 поступает в камеру смешения через патрубок 2. Для увеличения давления вещества используется энергия высоконапорного потока газа или пара с давлением p_k , подаваемого в камеру смешения через сопло 1. За счет турбулентного смешения высоко- и низкоскоростных потоков в камере смешения происходит увеличение скорости сжимаемого газа при одновременном уменьшении скорости высоконапорного потока. В диффузоре кинетическая энергия движения потока переходит в энергию давления так, что давление потока получает значение $p_k > p_1 > p_2$.

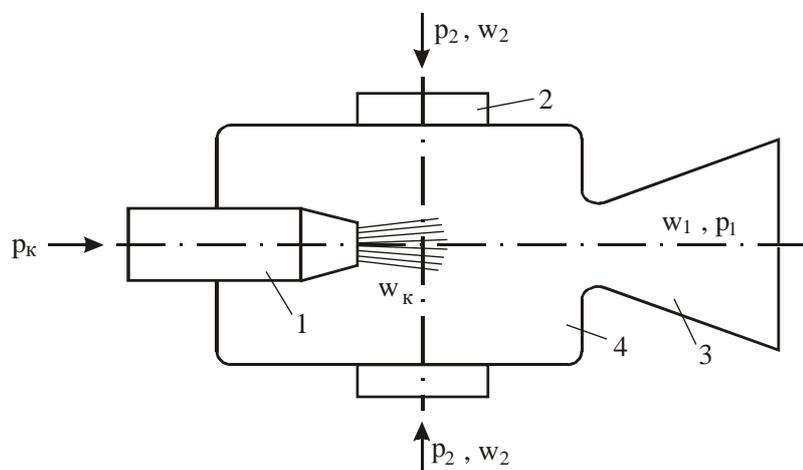


Рисунок 3.4 – Схема эжектора:

1 - сопло, 2 - патрубок, 3 - диффузор, 4 - камера смешения

Чем вызвано применение парового эжектора? Для получения не слишком низких температур ($3...10^0\text{C}$) в качестве хладагента может быть использован водяной пар. Однако при температурах вблизи 0^0C удельный объем пара весьма велик, т.е. плотность его мала ($\rho = 1/v$, где v - удельный объем, $\text{м}^3/\text{кг}$). Поршневой компрессор для сжатия пара малой плотности был бы очень громоздким. Поэтому применяется значительно более компактный, хотя и гораздо менее совершенный аппарат - паровой эжектор.

Водяной пар, образовавшийся при расширении насыщенной воды в редукционном вентиле 1 (рисунок 3.5,а) от p_1 до p_2 , поступает в испаритель 2, размещенный в охлаждаемом объеме. Из испарителя пар высокой степени сухости при давлении p_2 направляется в камеру смешения эжектора 3. В сопло эжектора подается пар из котла 4 с давлением p_k . Расходы пара, подаваемого в камеру смешения эжектора из испарителя и в сопло эжектора из котла, подбираются таким образом, чтобы давление пара на выходе из диффузора равнялось p_1 . Из эжектора сухой насыщенный пар направляется в конденсатор 5, где он конденсируется, отдавая теплоту охлаждающей воде. Поток конденсата при давлении p_1 , выходящий из конденсатора, раздваивается – большая часть воды направляется в холодильный контур, на вход редукционного вентиля, а мень-

шая часть – к насосу 6, в котором давление повышается до p_k . Насос подает воду в котел. Парообразование происходит за счет теплоты, подводимой в котле.

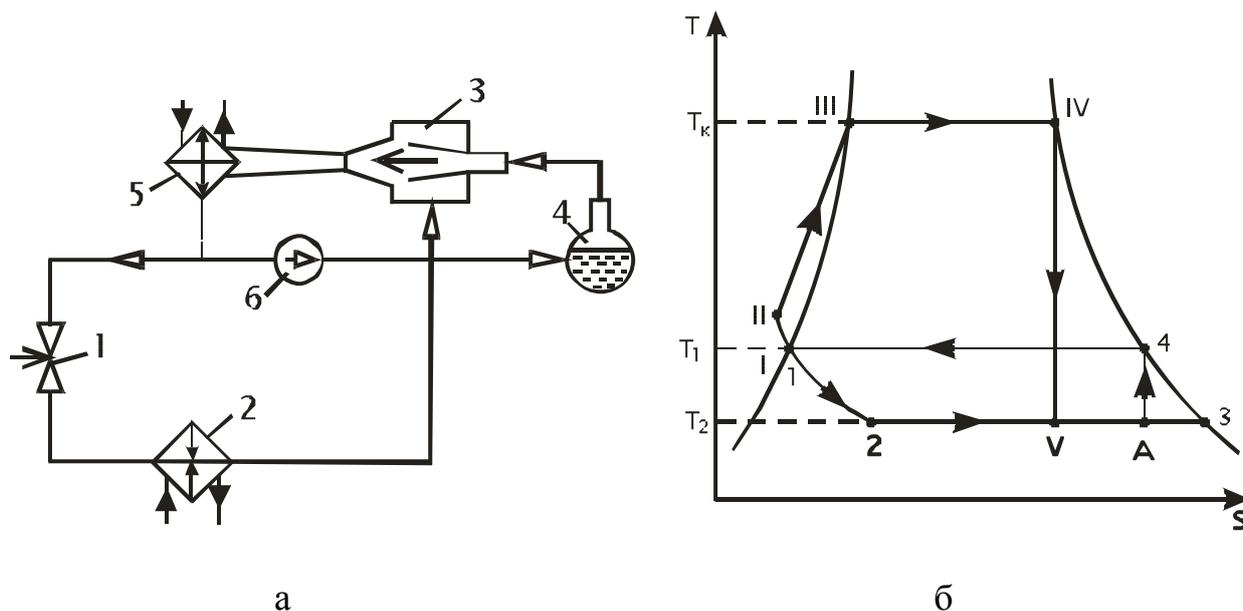


Рисунок 3.5 – Принципиальная схема парозежекторной холодильной машины и цикл ее работы:

а - схема машины; б - цикл машины;
 1 - редукционный вентиль; 2 - испаритель; 3 - паровой эжектор; 4 - котел;
 5 - конденсатор; 6 - насос.

В Ts -диаграмме (рисунок 3.5,б) линия 1-2 - процесс адиабатного дросселирования насыщенной воды в редукционном вентиле; 2-3 - изобарно-изотермический процесс в испарителе.

В этой же диаграмме изображен цикл, совершаемый той частью пара, которая циркулирует в контуре котел - эжектор - конденсатор - котел. Линия I - II - процесс повышения давления воды в насосе; II - III - IV - процесс подвода теплоты в котле по изобаре $p_k = \text{const}$ (II - III - нагрев до кипения, III - IV - парообразование); IV - V - процесс расширения пара в сопле эжектора. Пар расширяется в сопле до давления p_2 (т.V) и смешивается затем с паром того же давления, поступившим в эжектор из испарителя (т.3). В результате смешения влажного пара в состоянии V с сухим насыщенным паром в состоянии 3 получается пар промежуточной (между точками V и 3) степени сухости - т.А.

Линия А - 4 соответствует повышению давления обоих потоков пара в диффузоре эжектора от p_2 до p_1 , а 4-1 - процессу конденсации этого количества пара в конденсаторе.

Так как в цикле парозежекторной холодильной машины работа извне не подводится (работой насоса пренебрегаем), а вместо нее подводится теплота в котле, эффективность цикла такой машины характеризуется коэффициентом теплоиспользования:

$$\xi = q_2/q_k, \quad (3.5)$$

где q_2 - теплота, отводимая из охлаждаемого объема, q_k - теплота, подводимая в котле.

Или

$$\xi = \frac{i_3 - i_2}{(i_{IV} - i_1)g},$$

где g - отношение количества пара с давлением p_k , подаваемого в сопло эжектора из котла, к количеству пара, поступающего в камеру смешения эжектора из испарителя.

Коэффициент теплоиспользования ξ нельзя непосредственно сравнивать с холодильным коэффициентом, так как в выражении для холодильного коэффициента ε фигурирует затраченная в цикле работа, а в выражении для коэффициента теплоиспользования - затраченная в цикле теплота q_k .

Пароводяные эжекторные холодильные машины выполняют в виде агрегатов, включающих теплообменные аппараты, эжекторы и внутримашинный трубопровод с запорной, регулирующей и защитной арматурой. Агрегатированные машины имеют холодопроизводительность от 200 до 2000 кВт.

3.1.5. Принцип действия теплового насоса

В процессе работы всякой холодильной установки теплота отбирается из охлаждаемого объема и сообщается среде с более высокой температурой. Следовательно, результатом осуществления холодильного цикла является не только охлаждение теплоотдатчика, но и нагрев теплоприемника.

Это позволило Кельвину в 1852 г. выдвинуть предложение об использовании холодильного цикла для отопления помещений, т.е. о создании так называемого теплового насоса.

Тепловым насосом называют холодильную установку, используемую обычно для подвода теплоты к нагреваемому объему. Такая установка как бы «перекачивает» теплоту из холодного источника в горячий. В горячий источник поступает теплота в количестве

$$q_1 = q_2 + L_{\text{ц}}, \quad (3.6)$$

где q_2 – количество теплоты, отнимаемое от холодного источника;

$L_{\text{ц}}$ – работа, подводимая извне, для осуществления холодильного цикла.

Эффективность теплового насоса оценивается **отопительным коэффициентом**:

$$\varepsilon_{\text{отоп}} = q_1/L_{\text{ц}} \quad (3.7)$$

Отопительный коэффициент связан с холодильным коэффициентом:

$$\varepsilon_{\text{отоп}} = \varepsilon + 1, \quad (3.8)$$

таким образом, чем выше ε , тем выше и $\varepsilon_{\text{отоп}}$.

На осуществление любого холодильного цикла расходуется подводимая от внешнего источника работа $L_{\text{ц}}$ (в парозжекторной, абсорбционной и сорбционной установках подводится не работа, а теплота). Разумеется, вся эта работа может быть полностью превращена в теплоту (например, в электронагревателе), которую можно будет использовать для нагрева помещения. Преимущество теплового насоса перед любыми другими отопительными установками состоит в том, что при затрате одного и того же количества энергии ($L_{\text{ц}}$) с помощью теплового насоса подводится всегда большее количество теплоты ($L_{\text{ц}} + q_2$), чем то, которое подводится при любом другом способе отопления (при электрона-

греве это количество теплоты равно $L_{ц}$). Причина в том, что, если электронагреватель лишь превращает работу в теплоту, то тепловой насос с помощью того же количества работы превращает теплоту низкого температурного потенциала в теплоту более высокого температурного потенциала ("перекачивает" тепло). Поскольку в тепловом насосе всегда $q_1 > L_{ц}$, то всегда $\varepsilon_{отоп} > 1$.

Если в тепловом насосе осуществляется обратный цикл Карно, то при температуре охлаждаемого пространства 0°C и температуре нагреваемого помещения 25°C получим:

$$\varepsilon_{отоп} = \varepsilon + 1 = \frac{T_2}{T_1 - T_2} + 1 = \frac{T_1}{T_1 - T_2} = \frac{25 + 273}{25 + 273 - 273} = 11,9$$

В этом случае в отапливаемое помещение подается в 11,9 раз теплоты больше, чем величина работы, затраченной в цикле.

Отопительные коэффициенты реальных тепловых насосов имеют меньшее значение из-за потерь вследствие необратимости процессов, происходящих в установках.

Серьезным недостатком тепловых насосов является их высокая стоимость. По сравнению с нагревательными устройствами стоимость тепловых насосов во много раз выше.

Контрольные вопросы

1. Какие холодильные машины используют фазовый переход вещества?
2. Какие холодильные машины используют процесс расширения воздуха?
3. Какие холодильные машины используют механическую энергию?
4. Какие холодильные машины являются теплоиспользующими?
5. Каков принцип действия газовой холодильной машины?
6. Какое свойство растворов используется в абсорбционных холодильных машинах?
7. Каков принцип действия абсорбционной холодильной машины?
8. Какой узел абсорбционной холодильной машины используется для сжатия пара?
9. Какие бинарные растворы применяются в абсорбционных холодильных машинах?
10. В чем особенность сорбционных холодильных машин?
11. Что такое паровой эжектор, и каков его принцип действия?
12. Каков принцип действия парожеткторной холодильной машины?
13. Чем характеризуется эффективность работы теплового насоса?
14. Каков недостаток теплового насоса?

3.2. Компрессоры холодильных машин

В паровых компрессионных машинах используют поршневые, ротационные, винтовые и турбокомпрессоры. Наиболее распространенный тип современных холодильных компрессоров – поршневые.

3.2.1. Поршневые компрессоры

Поршневые компрессоры подразделяют по следующим основным признакам.

1. *По величине холодопроизводительности* поршневые компрессоры подразделяют на малые (Q_0 - до 12 кВт), средние ($Q_0 = 12 \dots 120$ кВт) и крупные (Q_0 - более 120 кВт).
2. *По роду хладагента* компрессоры подразделяются на аммиачные, хладоновые и универсальные.
3. *По области применения* компрессоры подразделяются на стационарные и транспортные.
4. *По устройству кривошипно-шатунного механизма* различают компрессоры бескрейцкопфные (простого действия, в которых сжатие пара осуществляется одной стороной поршня) и крейцкопфные (двойного действия, в которых обе стороны поршня являются рабочими). Наиболее широко распространены бескрейцкопфные.
5. *По конструкции корпуса* компрессоры подразделяют на блоккартерные (общая отливка блока с картером) и разъемные (блок цилиндров и картер представляют собой отдельные детали).
6. *По числу цилиндров* различают компрессоры одно-, двух- и многоцилиндровые (до 16 цилиндров).
В зависимости от кинематической схемы и расположения цилиндров компрессоры делят на горизонтальные, вертикальные, с угловым расположением цилиндров - V-, W-, VV-образные, крестообразные, звездообразные; прямоточные и непрямоточные.
7. *По числу ступеней сжатия* компрессоры бывают одно- и многоступенчатые.
8. *По степени герметичности и числу разъемов* компрессоры подразделяются на:
 - герметичные - со встроенным электродвигателем в запаянном кожухе без разъемов;
 - бессальниковые - со встроенным электродвигателем, с разъемами и съемными крышками;
 - открытые, или сальниковые, в которых ведущий вал уплотняется при помощи сальника.

Открытые компрессоры

Наиболее распространены в настоящее время бескрейцкопфные открытые компрессоры простого действия.

Число цилиндров у бескрейцкопфных компрессоров колеблется от одного до шестнадцати.

Одно- и двухцилиндровые компрессоры, как правило, вертикальные. Если цилиндров большое количество, то применяют различные пространственные схемы их расположения.

Наибольшее распространение получили блок-картерные компрессоры. В цилиндрическую часть блок-картера вставляются сменные цилиндрические гильзы. Блок-картерные компрессоры по сравнению с разъемными компрессорами отличаются большей жесткостью и прочностью при меньшей толщине стенок цилиндров; их изготовление и ремонт проще.

Цилиндры имеют воздушное или водяное охлаждение в зависимости от вида применяемого хладагента и тепловых режимов, на которые рассчитан компрессор.

В прямоточном компрессоре всасывающие клапаны размещаются на днище поршня, а нагнетательные располагаются в верхней части цилиндра, в ложной крышке.

В непрямоточных компрессорах всасывающие и нагнетательные клапаны размещаются в верхней части цилиндра – клапанной плите. При движении поршня вниз давление в цилиндре компрессора становится ниже, чем во всасывающей полости, и пар проходит через всасывающий клапан в всасывающую полость, а затем через всасывающий клапан в полость цилиндра. При движении поршня вверх пар сжимается до давления конденсации и через нагнетательный клапан попадает в нагнетательную полость.

Компрессоры имеют двухпорный коленчатый вал с двумя коленами и углом развала колен 90° . Уплотнением выходного конца коленчатого вала в открытых компрессорах служит сальник. Для смазки цилиндров и механизма движения в аммиачных компрессорах используют масло ХА, ХА-30, ХС-40, в хладоновых компрессорах – масло ХФ-12-16, ХФ-22-24, ХФ-22с.

Бескрейцкопфные компрессоры разнообразны по конструктивному исполнению.

Унифицированные поршневые компрессоры выпускают в настоящее время для аммиака и хладонов четырех баз: I, II, III, IV: герметичные компрессоры I и II баз; III и IV баз бессальниковые и сальниковые. Все компрессоры непрямоточные. Количество цилиндров в них 1, 2, 4, 6, 8, диаметры цилиндров – 42; 67,5; 76; 115 мм.

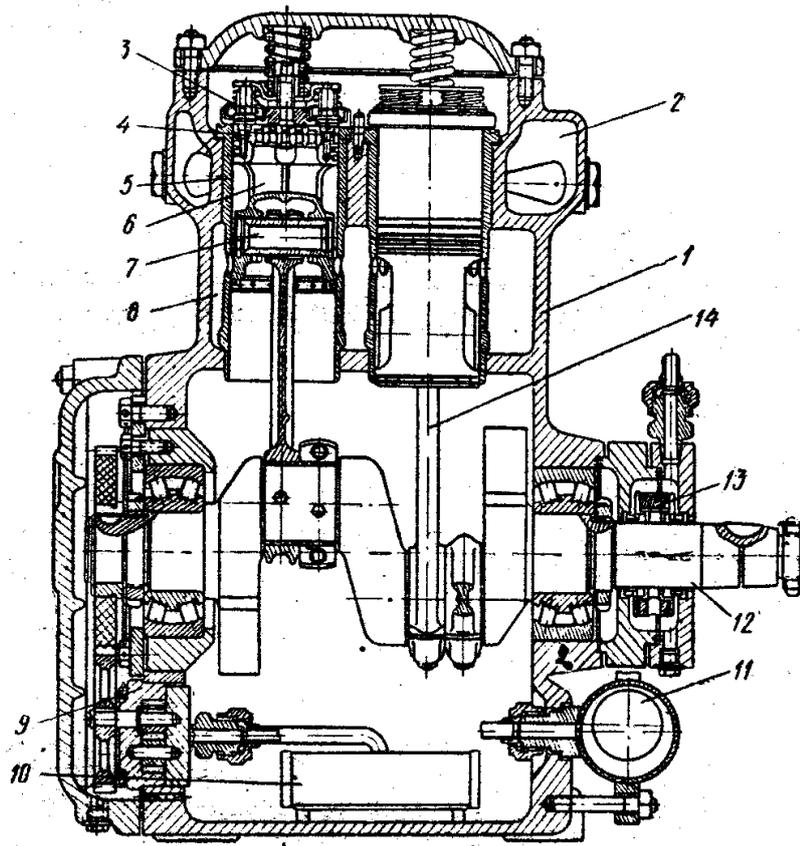
Компрессоры герметичные и бессальниковые предназначены для хладонов, сальниковые – для аммиака и хладонов.

При маркировке унифицированных поршневых компрессоров применяют следующие обозначения: П – поршневой, Ф – хладоновый, А – аммиачный, В – вертикальный, V – V-образный, W – W-образный, VV – веерообразный, Б – бессальниковый, Г – герметичный, О – оппозитный. Цифры после букв означают холодопроизводительность (в кВт).

Герметичные компрессоры выпускают марок ПГ5, ПГ7, ПГ10, расположение цилиндров горизонтальное. В сальниковых компрессорах марок П14, П20, П28 и других расположение цилиндров V-, W-, VV-образное. В бессальниковых компрессорах марок ПБ5, ПБ7 до ПБ220 расположение цилиндров V-, W-, VV-образное.

**Ри-
Сальнико-
ступенча-
картерный
ный ком-**

1-
2 — полость
башки; 3 —
ный клапан;
вающий кла-
линдровая
поршень; 7 —
палец; 8 —
сывания; 9 —
сос; 10 — мас-
фильтр гру-
11 — масля-
тонкой очи-
ленчатый
сальник; 14 —



**сунок 3.6 —
вый одно-
тый блок-
прямоч-
прессор:**

блок-картер;
водяной ру-
нагнетатель-
4 — всасы-
пан; 5 — ци-
гильза; 6 —
поршневой
полость вса-
масляный на-
ляный
бой очистки;
ный фильтр
стки; 12 — ко-
вал; 13 —
шатун.

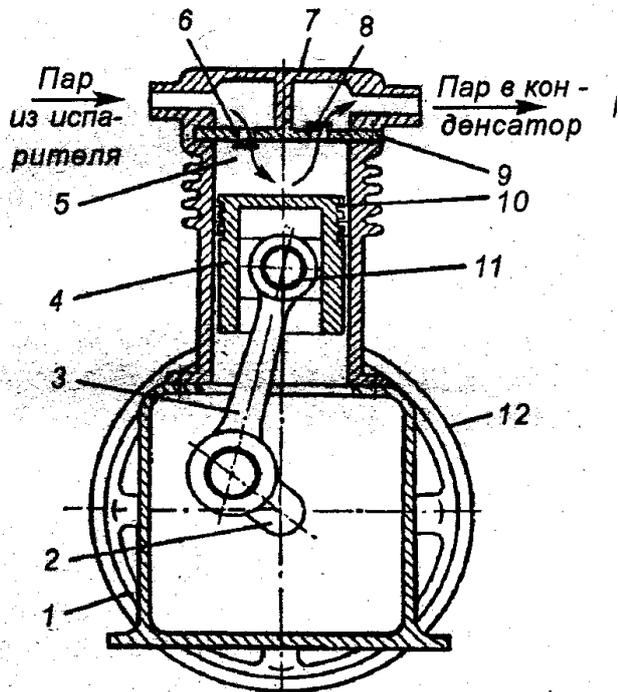


Рисунок 3.7 — Схема одноступенчатого непрямоточного компрессора:

1 — картер; 2 — коленчатый вал; 3 — шатун;
4 — поршень; 5 — цилиндр; 6 — всасывающий
клапан; 7 — клапанная крышка с перегород-
кой; 8 — нагнетательный клапан; 9 — клапанная
плита; 10 — поршневые кольца; 11 — поршне-
вые пальцы; 12 — маховик.

Индикаторная диаграмма. При испытании компрессора снимается индикаторная диаграмма, которая представляет собой зависимость между давлением и объемом газа, всасываемым и нагнетаемым компрессором за один оборот коленчатого вала.

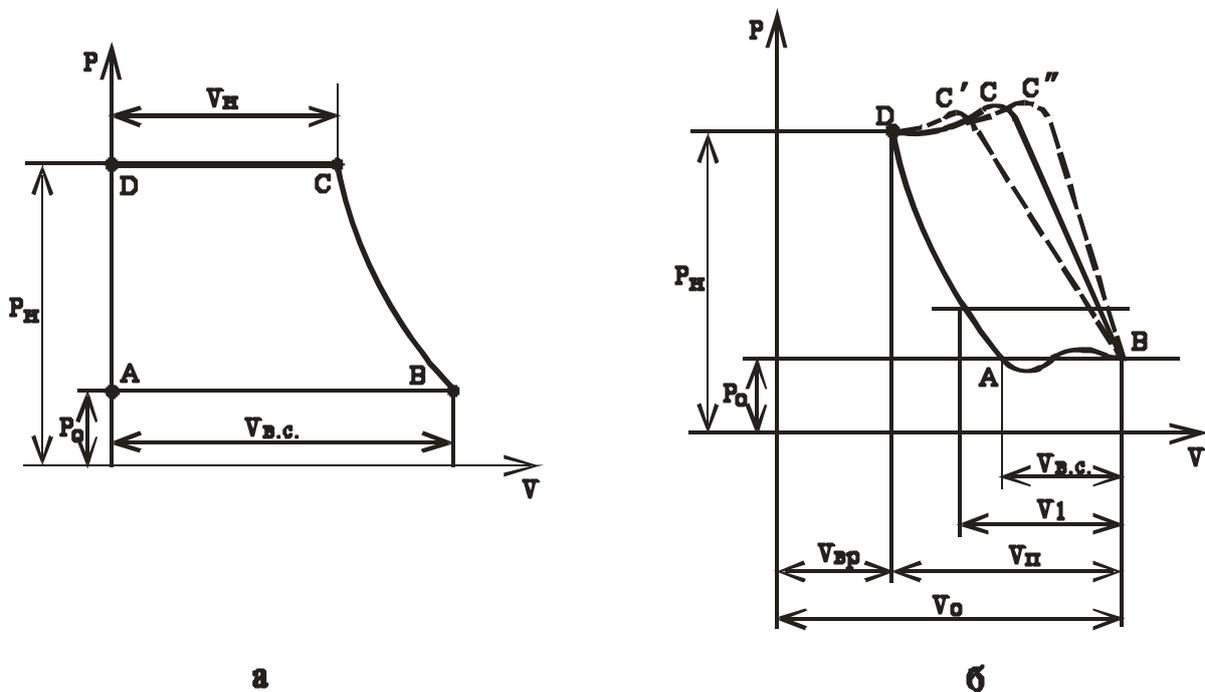


Рисунок 3.8 – Индикаторные диаграммы одноступенчатого компрессора простого действия:
а - теоретическая; б - рабочая.

В теоретическом компрессоре поршень в крайних (мертвых) положениях, которым соответствуют точки В и D на диаграмме (рисунок 3.8.а), вплотную подходит к крышке цилиндра и всасывание начинается сразу же по окончании нагнетания. При этом процесс всасывания отражается линией АВ, сжатия - ВС и нагнетания - CD.

Процесс сжатия в реальном компрессоре существенно отличается от теоретического (рисунок 3.8.б). Между поршнем в крайнем положении и крышкой цилиндра всегда имеется зазор, образующий свободный объем, или так называемое *вредное (мертвое) пространство*. В этом пространстве остающийся после окончания нагнетания, сжатый до давления p_n пар при обратном ходе поршня расширяется, и поэтому всасывающий клапан открывается лишь при снижении давления до величины давления всасывания. Таким образом поршень определенный отрезок пути в цилиндре движется как бы вхолостую - до точки А, вследствие чего производительность компрессора снижается. Величина вредного пространства выражается в долях от рабочего объема цилиндра εV_n , где ε - отношение объема вредного пространства к объему, описываемому поршнем, т.е.

$$\varepsilon = V_{вр}/V_n.$$

На рисунке 3.6.б линия сжатия BC' и BC'' характеризуют соответственно изотермические и адиабатные процессы. Так как площадь диаграммы выражает работу, совершаемую в процессе сжатия, то, очевидно, что при изотермическом сжатии эта работа будет минимальна, а при адиабатном - максимальна. В реальных условиях процесс сжатия идет по политропе BC, отражающей процесс сжатия с неполным отводом теплоты.

Производительность компрессора

Объем пара, всасываемый поршнем V_{BC} (см. рисунок 3.8.б) за один ход, из-за влияния вредного пространства меньше объема V_{Π} , описываемого поршнем, что приводит к уменьшению производительности. Это снижение производительности учитывается объемным к.п.д. компрессора λ_0 , который определяется выражением:

$$\lambda_0 = \frac{V_{BC}}{V_{\Pi}} = \frac{V_{BC}}{W_T}, \quad (3.9)$$

где W_T - теоретическая производительность компрессора, равная полезному объему, описываемому поршнем в единицу времени.

Для поршневого компрессора простого действия:

$$W_T = FSn/60, \quad (3.10)$$

где F - площадь поперечного сечения поршня (m^2);

S - длина хода поршня (м);

n - число оборотов вала ($мин.^{-1}$).

Для поршневого компрессора двойного действия за один оборот вала:

$$W_T = FS + (F-f)S = (2F - f)S, \quad (3.11)$$

а за n об/мин:

$$W_T = [(2F - f)Sn]/60, \quad (3.12)$$

где f - площадь поперечного сечения штока (m^2).

Обозначим:

$$x = \frac{V_0 - V_{BC}}{V_{\Pi}}, \quad (3.13)$$

где $V_0 = V_{\Pi} + \varepsilon V_{\Pi}$ - полный объем цилиндра;

$V_{BC} = \lambda_0 V_{\Pi}$ - фактически всасываемый объем пара.

Тогда

$$x = \frac{V_{\Pi} + \varepsilon V_{\Pi} - \lambda_0 V_{\Pi}}{V_{\Pi}} = 1 + \varepsilon - \lambda_0,$$

следовательно,

$$\lambda_0 = 1 + \varepsilon - x. \quad (3.14)$$

Расширение пара в мертвом пространстве можно считать политропным $pV^n = \text{const}$. Тогда

$$p_n(\varepsilon V_{\Pi})^n = p_0(V_0 - V_{BC})^n = p_0(xV_{\Pi})^n,$$

где $xV_{\Pi} = V_0 - V_{BC}$ - объем, который занимает пар после расширения его в мертвом пространстве от p_n до p_0 .

Отсюда

$$x = \varepsilon \left(\frac{p_n}{p_0} \right)^{\frac{1}{n}}. \quad (3.15)$$

Подставляя это выражение в уравнение (3.14), получим:

$$\lambda_0 = 1 - \varepsilon \left[\left(\frac{p_H}{p_0} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right]. \quad (3.16)$$

Таким образом, значение λ_0 существенно зависит от величины ε , степени сжатия $\theta = p_H/p_0$ и показателя политропы расширения n , т.е. конструкции компрессора и свойств сжимаемого пара.

С увеличением степени сжатия значение λ_0 снижается и может стать равным нулю. Степень сжатия, при которой $\lambda_0 = 0$, называют *пределом сжатия*. В этом случае пар, находящийся в мертвом пространстве, расширяясь, занимает весь объем цилиндра, и всасывание прекращается. Производительность компрессора при этом равна нулю.

Производительность компрессора снижается также вследствие утечек пара через неплотности в клапанах и подогрева всасываемого пара при соприкосновении его с нагретыми стенками цилиндра, поскольку при нагреве пара его удельный объем увеличивается, а количество всасываемого пара уменьшается. Поэтому при расчете производительности компрессора для учета потерь вводят коэффициент подачи. Под коэффициентом подачи λ понимают отношение объема пара, подаваемого компрессором (и приведенного к условиям всасывания) к объему, описываемому поршнем, т.е. коэффициент подачи учитывает все виды потерь производительности. Коэффициент подачи может быть представлен в виде:

$$\lambda = \lambda_0 \cdot \lambda_1, \quad (3.17)$$

где λ_1 - коэффициент, учитывающий утечку пара через неплотности и подогрев его на входе в цилиндр.

Приближенно

$$\lambda = \lambda_0 (1,01 \dots 1,02 \frac{p_H}{p_0}). \quad (3.18)$$

Тогда фактическая производительность W , если пренебречь площадью штока, определится выражением:

$$W = \lambda z F S n, \quad (3.19)$$

где z - число всасываний за один ход поршня (для компрессоров простого действия $z = 1$).

Если необходимо сжимать до давлений свыше 0,5...0,7 МПа, применяют многоступенчатые компрессоры. Это позволяет также избегать чрезмерного повышения температуры пара и дает возможность повысить эффективность работы компрессора.

Рассмотрим эти процессы с помощью теоретической диаграммы p - V (рисунок 3.9).

Процесс в первой ступени двухступенчатого компрессора часто происходит по адиабате ab от p_0 до p_{H1} , далее по прямой bc - охлаждение в промежуточном холодильнике до начальной температуры пара, лежащей на изотерме

асе. Во второй ступени пар сжимается по адиабате cd до конечного давления p_{H2} . Поэтому процесс двухступенчатого сжатия с промежуточным охлаждением пара ближе к изотерме (идет по ломаной $abcd$), чем к адиабате abf , которая характеризует процесс сжатия пара в одноступенчатом компрессоре до того же давления. Площадь $bcdf$ выражает выигрыш в работе при двухступенчатом сжатии по сравнению с одноступенчатым. Отсюда ясно, что увеличение числа ступеней ведет к приближению процесса сжатия к изотермическому, но, с другой стороны, это приводит к значительному усложнению конструкции компрессора. Поэтому число ступеней сжатия в компрессорах обычно не более 6...7.

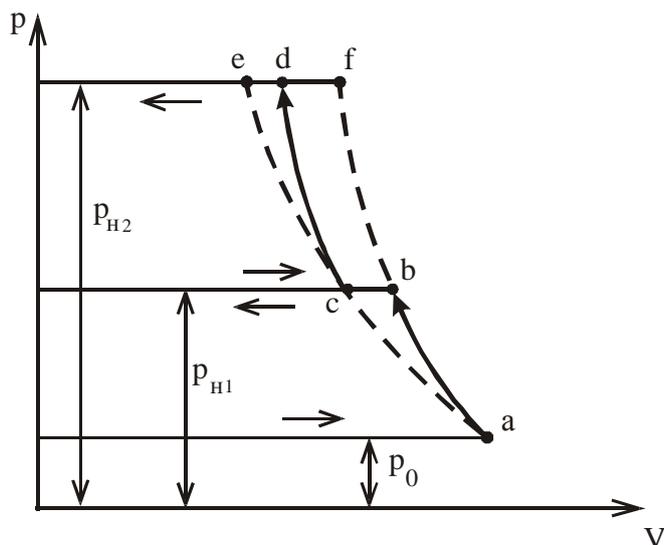


Рисунок 3.9 – Теоретическая pV -диаграмма

Процесс сжатия в многоступенчатых компрессорах наиболее экономичен, если степени сжатия во всех ступенях одинаковы:

$$\theta_{\tau} = \left(\frac{p_H}{p_0} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (3.20)$$

где m - число ступеней сжатия.

Производительность многоступенчатых компрессоров определяют по всасываемому пару на первой ступени по уравнению (3.19).

Вследствие потерь давления между ступенями, степень сжатия должна быть несколько больше теоретической:

$$\theta_{\text{д}} = \psi \left(\frac{p_H}{p_0} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (3.21)$$

где $\psi = 1,1 \dots 1,5$ - коэффициент, учитывающий потери давления между ступенями.

Бессальниковые компрессоры

Самым уязвимым конструктивным узлом сальниковых (открытых) компрессоров является уплотнение коленчатого вала. Утечка хладагента наиболее вероятна через сальники. Особенно велика опасность утечки в малых хладонных компрессорах. Отличительной особенностью бессальниковых компрессоров (рисунок 3.10) является отсутствие в них сальников, так как электродвигатель находится на одном валу с компрессором и располагается в картере компрессора.

Такая конструкция компрессоров позволяет уменьшить их габариты и практически полностью исключить утечку рабочего тела. Бессальниковые компрессоры непрямочные. Разъемные соединения и съемные крышки обеспечивают доступ к внутренним частям компрессора. Обмотки электродвигателей компрессоров охлаждаются всасываемым паром хладагента. Смазка трущихся деталей в компрессорах может быть разбрызгиванием, принудительной и комбинированной.

Холодопроизводительность таких компрессоров находится в пределах от нескольких киловатт до нескольких десятков киловатт (средние по величине холодопроизводительности компрессоры).

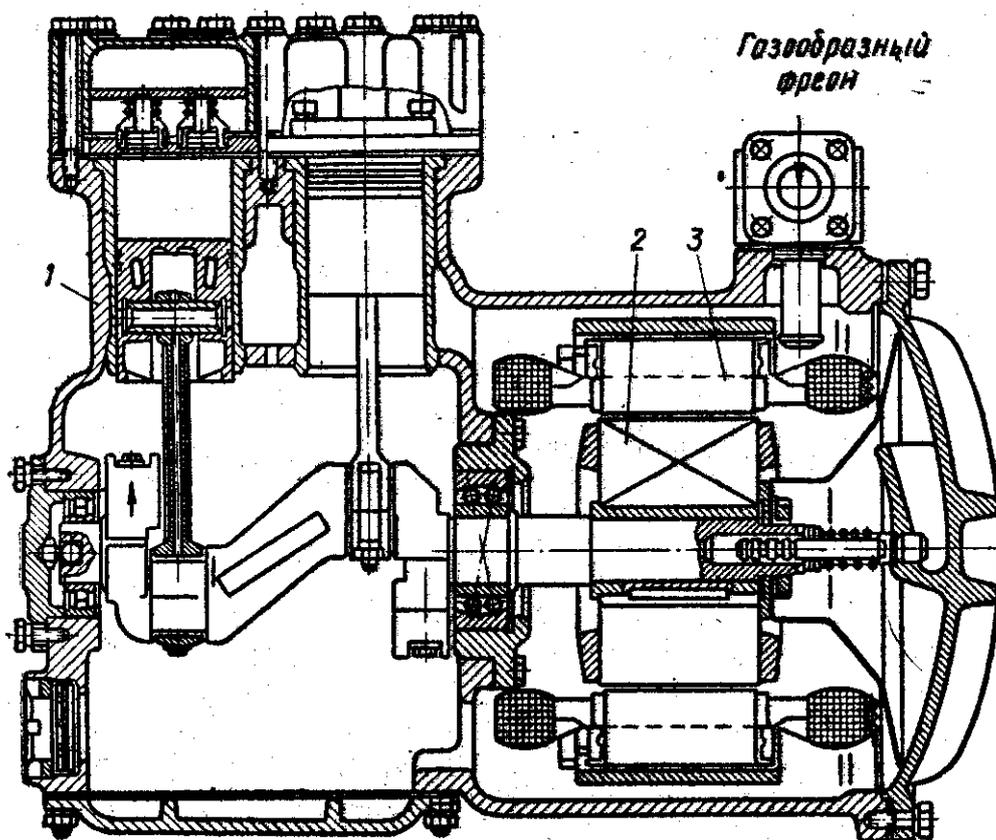


Рисунок 3.10 – Бессальниковый блок-картерный компрессор:
1 – блок-картер, 2 – ротор; 3 – статор.

Герметичные компрессоры

Компрессор и электродвигатель заключены в них в общий герметически закрытый сварной стальной кожух (рисунок 3.11). Электродвигатели устанавливают однофазные и трехфазные асинхронные. Ротор электродвигателя насаживается непосредственно на вал компрессора. Частота вращения вала может быть близка к 50 с^{-1} (3000 об/мин), что позволяет уменьшить геометрические размеры, габариты и массу компрессора при той же холодопроизводительности. Обмотка электродвигателя охлаждается потоком всасываемого пара хладагента, благодаря чему возможно повышение нагрузки на него. Герметичные машины почти бесшумны в работе. Их холодопроизводительность находится в пределах от нескольких сотен ватт, до 10 кВт. Герметичные компрессоры изготавливают трех исполнений, предназначенных для трех различных диапазонов кипения хладагента: Н - низкотемпературного - от -40 до -25°C ; С - среднетемпературного - от -25 до 10°C ; и В - высокотемпературного - от -10 до 10°C .

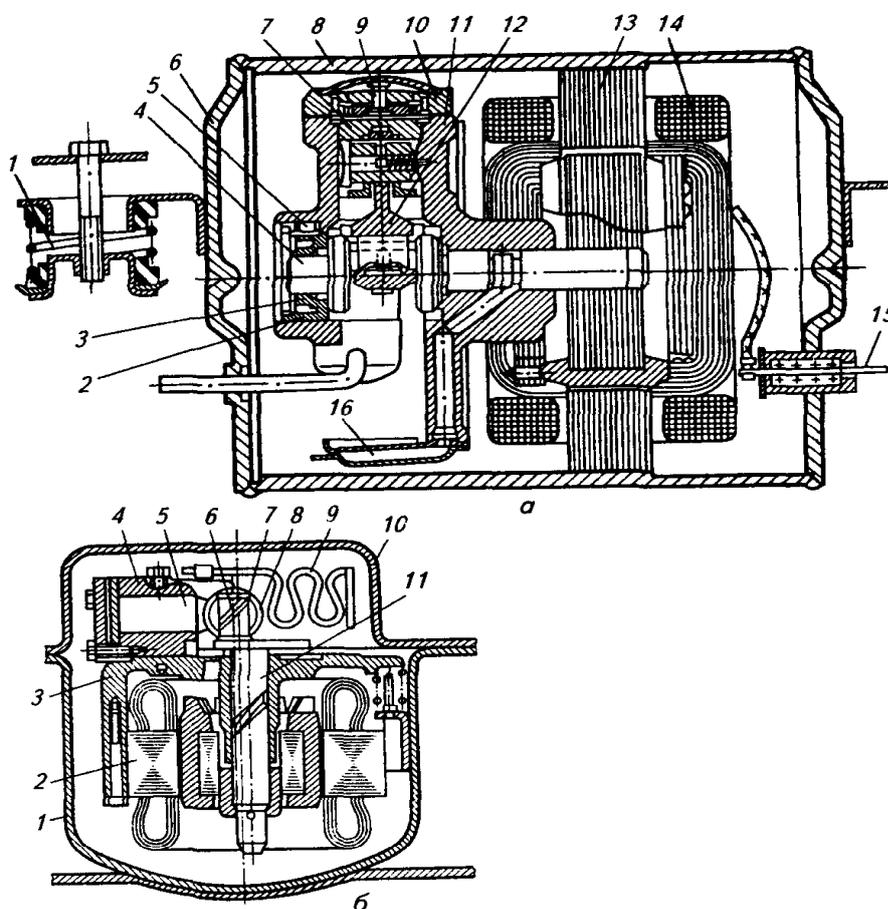


Рисунок 3.11 – Герметичные компрессоры:

а – горизонтальный с наружной подвеской: 1 – пружинная подвеска; 2 – замочное кольцо; 3 – передний подшипник вала; 4 – коленчатый вал; 5 – стопор подшипника; 6 – крышка кожуха; 7 – поршень; 8 – кожух; 9 – заклепка; 10 – головка; 11 – корпус; 12 – шатун; 13 – ротор; 14 – статор электродвигателя; 15 – проходные контакты;

б – вертикальный с внутренней подвеской: 1 – кожух; 2 – статор; 3 – корпус; 4 – цилиндр; 5 – поршень; 6 – кривошип; 7 – кулиса; 8 – ползун; 9 – трубчатый глушитель; 10 – крышка кожуха; 11 – вал.

Среднетемпературные компрессоры используют для торгового холодильного оборудования и бытовых холодильников. В бытовых холодильниках применяют в основном одноцилиндровые поршневые непрямочные герметичные компрессоры с вертикальным цилиндром и горизонтальным валом. Электродвигатели в последнее время используют однофазные асинхронные с пусковой обмоткой и короткозамкнутым ротором, скорость вращения которого, а, следовательно, и вала компрессора 50 с^{-1} (3000 об/мин).

Компрессоры Н-исполнения применяют в низкотемпературном холодильном оборудовании и небольших морозильных устройствах. Высокотемпературные компрессоры используют для кондиционеров, охладителей напитков, соков, молока и других устройств.

Основные конструктивные узлы и детали поршневых компрессоров

Основными конструктивными узлами и деталями поршневых компрессоров являются рама, картер, блок-картер, цилиндры, коленчатые валы, шатун, поршни, поршневые кольца, клапаны, сальники.

Картер представляет собой конструктивную основу машины. Картер вертикальных и V-образных компрессоров имеет вид коробки с боковыми окнами, которые закрываются съемными крышками. Крышку со стороны маховика, через которую проходит коленчатый вал компрессора, называют задней, а противоположную ей - передней. Сверху картера крепится блок цилиндров. Многие конструкции вертикальных компрессоров выполняются **блок-картерными**. В этом случае цилиндры и картеры отливаются в виде одной детали. Блок-картерные компрессоры компактнее, имеют меньше фланцевых соединений, проще и дешевле в производстве.

В каждый **цилиндр** запрессовывают сменные гильзы, которые в случае износа могут быть заменены новыми. Сменные гильзы цилиндров уплотняют по верхнему и нижнему поясам резиновыми кольцами. Для охлаждения цилиндров верхнюю часть их боковой поверхности отливают с ребрами (при охлаждении воздухом) или со специальной полостью (при охлаждении водой - водяной рубашкой).

Коленчатые валы по конструкции могут быть кривошипными и эксцентриковыми. Их выполняют штампованными, литыми или цельноковаными из высококачественной углеродистой или легированной стали. Опорой коленчатого вала служат подшипники, расположенные в крышках картера или корпусе. Чтобы движение поршня было равномерным, на конец коленчатого вала, выступающий из картера, насаживается маховик - шкив большого диаметра с тяжелым ободом.

При непосредственном соединении компрессора с электродвигателем необходимость в маховике отпадает, его роль выполняет ротор двигателя.

Шатуны передают движение от коленчатого вала к поршням. Шатуны - штампованные стальные детали двутаврового сечения с разъемной нижней го-

ловкой с вкладышем, залитым баббитом, и неразъемной верхней головкой с бронзовой втулкой.

Нижние головки шатунов, которые охватывают шейки коленчатого вала, стягиваются стальными болтами с зашплинтованными корончатыми гайками. Верхние головки шатунов пальцами поршня закрепляются в поршне.

Поршни по конструкции делят на дисковые и тронковые (эти же поршни применяются и в двигателях внутреннего сгорания). Дисковые поршни используют в крупных крейцкопфных компрессорах двойного действия, когда по обе стороны поршня расположены рабочие объемы цилиндра. Тронковые поршни могут быть двух типов: проходные для прямоточных машин, непроходные для непрямоточных.

Конструкция **проходных поршней** позволяет увеличить проходные сечения всасывающего и нагнетательного клапанов.

Непроходные поршни отличаются простотой конструкции и небольшой массой. Их используют в малых и средних непрямоточных компрессорах. Поршни для герметичных компрессоров делают без поршневых колец. Вместо них на боковой поверхности поршней протачивают неглубокие канавки для сбора и равномерного распределения масла по зеркалу цилиндра.

Всасывающие и нагнетательные **клапаны** выполняют в компрессоре распределительную функцию. Через всасывающие клапаны происходит засасывание паров хладагента из всасывающего трубопровода в цилиндр компрессора, а через нагнетательные – выталкивание сжатых паров в нагнетательный трубопровод. В поршневых холодильных компрессорах клапаны самодействующие, т.е. они открываются и закрываются под действием разности давления по обе их стороны. На всасывающие клапаны прямоточных компрессоров, расположенные в днище поршня, помимо давления пара, действуют силы инерции. В вертикальном прямоточном компрессоре при движении поршня вверх и достижении им верхней мертвой точки клапанная пластина по инерции стремится продолжить движение вверх, и клапан открывается, в то время как поршень после остановки начинает двигаться вниз. Когда же поршень останавливается в нижней мертвой точке, клапанная пластина по инерции стремится продолжить движение вниз, прижимается к седлу клапана, и он закрывается.

В бескрейцкопфных компрессорах применяют пластинчатые клапаны, получившие это название потому, что их рабочей запорной деталью служат тонкие (0,8...1,5 мм) стальные пластины.

Пластинчатые клапаны в зависимости от конфигурации и крепления клапанной пластины бывают кольцевые, полосовые и язычковые.

Кольцевые клапаны применяют в средних и крупных компрессорах.

В конструкциях клапанов, закрепленных на поршнях, используют беспружинные кольцевые и полосовые клапаны. Полосовые клапаны называют еще ленточными, так как в них отверстия для прохода пара перекрываются упругими пластинами, имеющими форму лент.

Предохранительные клапаны предотвращают аварии при чрезмерном повышении давления нагнетания. При превышении предельной разности давлений нагнетания и всасывания ($\Delta p = 1,68$ МПа) предохранительные клапаны

перепускают сжатый пар из полости нагнетания в полость всасывания. Применяют в основном пружинные самодействующие предохранительные клапаны. Когда разность давлений превышает допустимую, пружина сжимается, клапан открывается, и нагнетательная сторона компрессора соединяется со всасывающей.

Сальниками называются специальные устройства для уплотнения подвижных деталей, например, валов, штоков, плунжеров, с целью предотвращения утечек жидкостей, пара или газа. Применяют сальники с кольцами трения. Сальники открытых хладоновых компрессоров бывают сильфонного и мембранного типов.

3.2.2. Ротационные компрессоры

Ротационные компрессоры более уравновешены, чем поршневые, поскольку у них нет кривошипно-шатунного механизма, совершающего возвратно-поступательное движение. Кроме того, они не имеют всасывающих клапанов и могут работать при больших частотах вращения вала. Габариты ротационных компрессоров невелики. Изготавливают их с катящимися (рисунок 3.12), качающимися и вращающимися (рисунок 3.13) роторами, последние (пластинчатые компрессоры) – с двумя, четырьмя и более пластинами, с круглым или эллиптическим цилиндром.

Вал таких компрессоров расположен эксцентрично по отношению к цилиндру. На вал насажен ротор (поршень) с фрезерованными по всей длине пазами, в которые вставлены асботекстолитовые пластины. При вращении ротора пластины под действием центробежной силы выходят из пазов и прижимаются к поверхности цилиндра, образуя замкнутые полости.

Пар из всасывающего трубопровода захватывается пластинами, отсекается в верхней части цилиндра вращающимся ротором и сжимается. При дальнейшем вращении полость со сжатым паром соединяется с нагнетательным трубопроводом и пар выталкивается. Ротационные компрессоры используют в основном в установках большой холодопроизводительности в качестве ступеней низкого давления в агрегатах двухступенчатого сжатия. Но выпускают и герметичные компрессоры небольшой холодопроизводительности.

Ротационный герметичный компрессор с катящимся ротором состоит из неподвижного цилиндра и поршня-ротора, вращающегося на эксцентриковой шейке вала. К ротору при помощи пружины прижимается лопасть, разделяющая рабочий объем цилиндра на две части: в одной протекает процесс всасывания, а в другой – сжатия и нагнетания. При работе компрессора пары хладагента поступают через всасывающий патрубок в кожух, омывают электродвигатель и охлаждают его, затем через всасывающую трубку всасываются компрессором. Сжатые пары хладагента через нагнетательный клапан выталкиваются из цилиндра в глушитель, а из него по трубопроводу подводятся к нагнетательному штуцеру. Холодопроизводительность таких компрессоров - от 255 до 640 Вт.

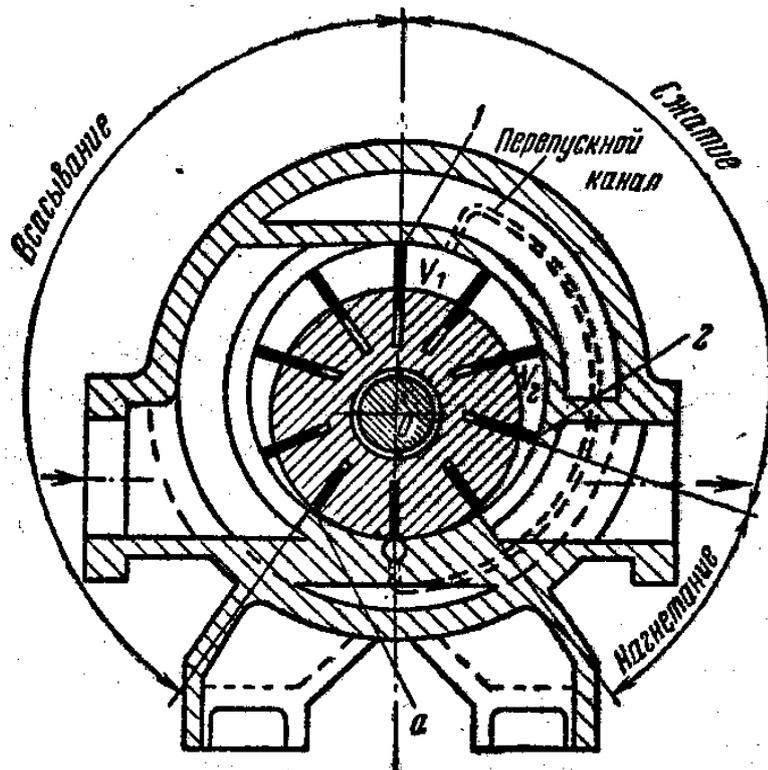


Рисунок 3.13 – Схема ротационного компрессора с вращающимся ротором

3.2.3. Винтовые компрессоры

Основу винтовых компрессоров составляют два ротора (оба с зубчато-винтовыми лопастями): ведущий и ведомый, расположенные в корпусе.

Винтовые впадины роторов, проходя мимо всасывающего окна, заполняются газообразным хладагентом. При дальнейшем вращении роторов пар сжимается, так как зубья одного ротора входят во впадины другого, и при этом уменьшается объем, занимаемый паром. К концу сжатия впадины со сжатым паром объединяются с нагнетательным окном. Винтовое расположение на роторах нескольких впадин обеспечивает непрерывность подачи пара компрессором.

Применяют большей частью маслозаполненные винтовые компрессоры, в рабочее пространство которых подается масло. Это повышает производительность компрессора вследствие уменьшения внутренних перетечек хладагента через зазоры между корпусом и роторами и между самими роторами, а также снижения температуры нагнетания хладагента. После прохождения компрессора хладагент направляется в маслоотделитель, где отделяется до 95% масла. Шестеренчатым насосом масло направляется в маслоохладитель и через фильтры снова подается в рабочее пространство компрессора и на смазку подшипников.

Винтовые компрессоры надежны в эксплуатации, их холодопроизводительность можно плавно регулировать с помощью золотникового устройства, изменяющего активную длину винтов, у них отсутствует трение в полости сжа-

тия. Они имеют довольно небольшие габариты и массу по сравнению с поршневыми и даже ротационными компрессорами.

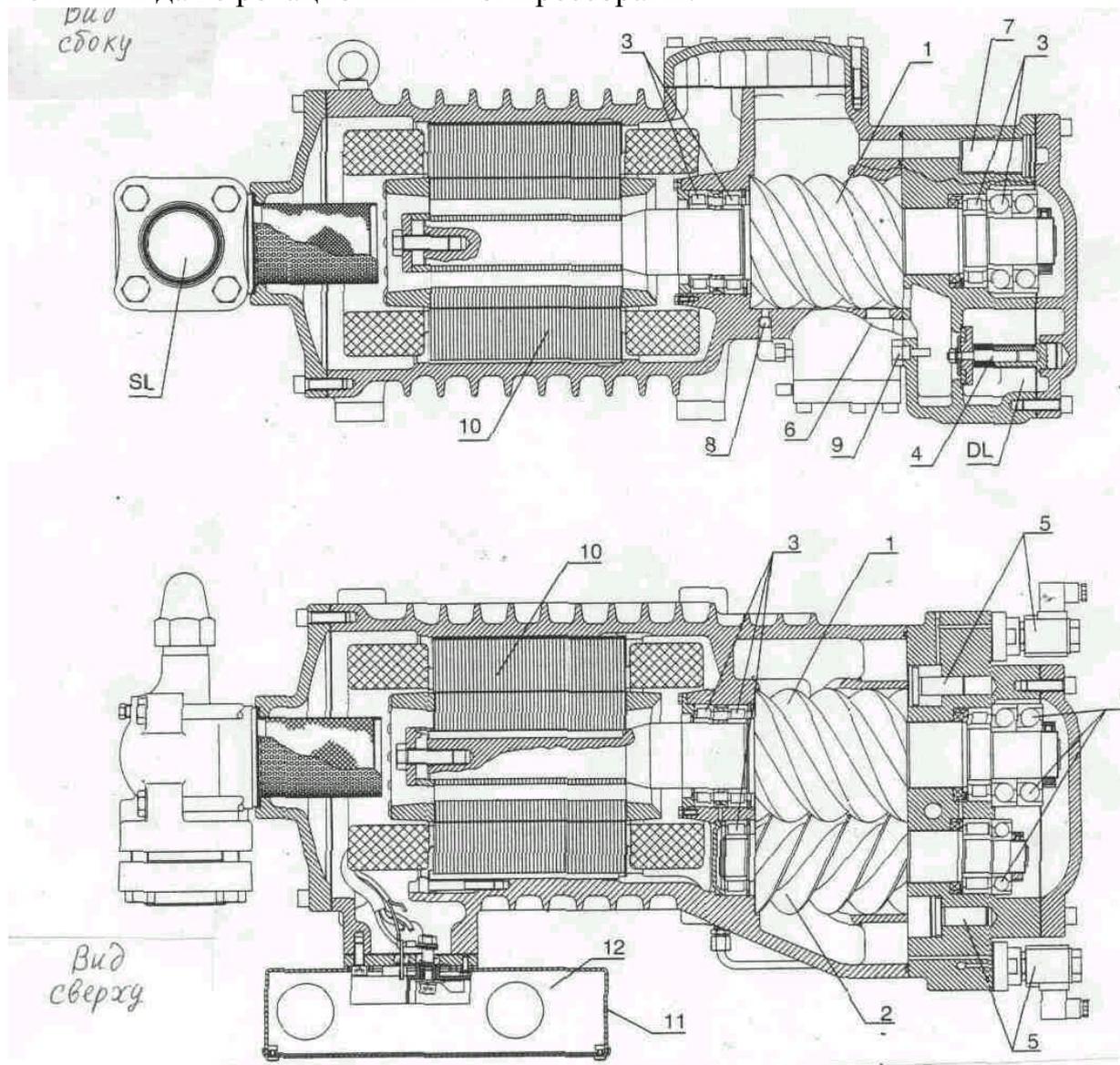


Рисунок 3.14 – Схема герметичного винтового компрессора HS. 74:

1- Ведущий ротор, 2- Ведомый ротор, 3- Подшипники качения, 4 - Обратный клапан, 5- Регулирование производительности /разгрузка при пуске, 6 - Vi-контроль, 7- Предохранительный клапан разности давления, 8 - Впрыск масла, 9- датчик контроля температуры нагнетания, 10- Встроенный двигатель, 11- Коробка управления, 12- Устройство защиты двигателя (не показано).

Винтовые компрессоры характеризуются очень низким пределом давления всасывания (5...2 кПа), что позволяет широко использовать их в низкотемпературных установках. Частота вращения ведущего ротора составляет у них 50 с^{-1} .

Наиболее целесообразно применение аммиачных винтовых компрессоров холодопроизводительностью 350...1745 кВт. При более низкой они утрачивают свои преимущества перед поршневыми по массе и габаритам из-за громоздкости маслосистемы.

3.2.4. Турбокомпрессоры

Турбокомпрессоры обладают большой холодопроизводительностью. В качестве хладагента наиболее широко в них используется аммиак. По сравнению с поршневыми они обладают рядом преимуществ:

- отсутствие клапанов;
- динамическая уравновешенность;
- высокооборотистость;

Турбокомпрессор обычно имеет несколько колес, поэтому он является многоступенчатой машиной. По принципу работы турбокомпрессоры подразделяют на центробежные и осевые.

Осевые компрессоры применяют для установок очень большой холодопроизводительности.

Центробежные компрессоры (рисунок 3.15) используют в холодильных машинах холодопроизводительностью от 500 до нескольких тысяч киловатт.

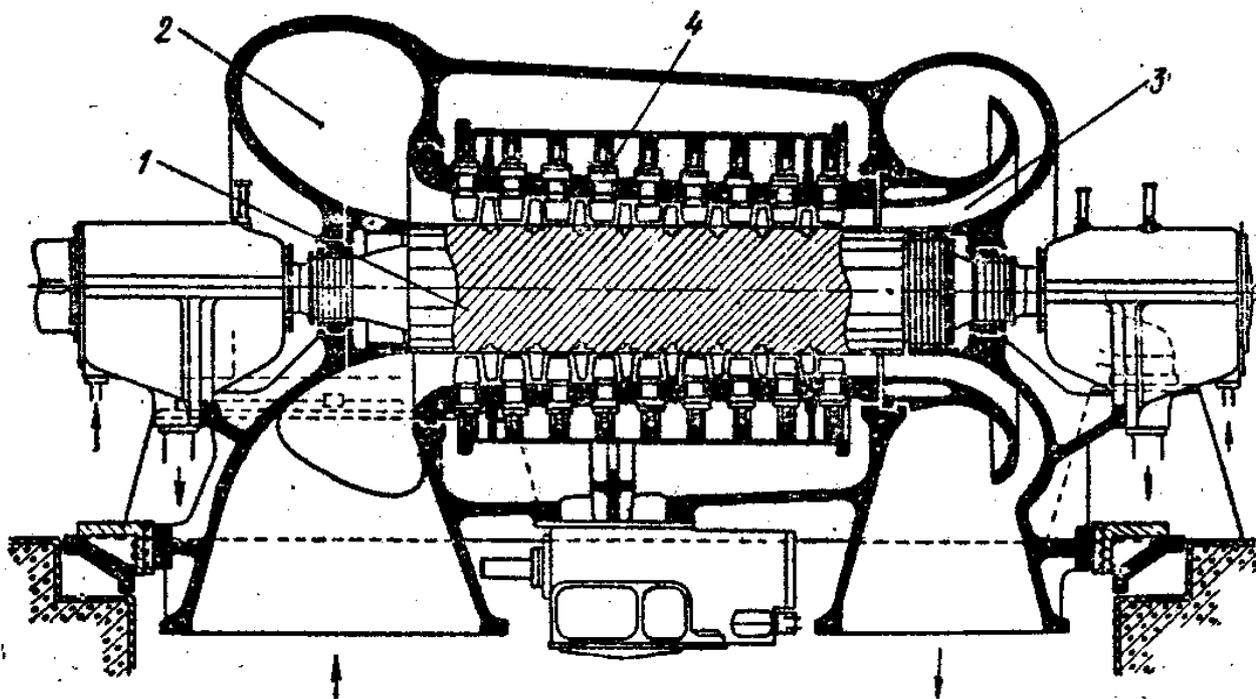


Рисунок 3.15 – Центробежный турбокомпрессор:

1 – уплотнение торцового типа; 2,3 – лабиринтные уплотнения с камерой для подачи пара хладагента; 4 – лопатки входного регулирующего аппарата осевого типа.

На валу центробежного компрессора вращаются рабочие колеса с лопатками, передающие кинетическую энергию хладагенту, который выбрасывается из колеса в диффузор, где его кинетическая энергия преобразуется в энергию давления. Диффузор выполняется безлопаточным, лопаточным и прямолинейным. Движение пара на рабочем колесе складывается из вращения его вместе с колесом (абсолютное движение) и перемещения вдоль лопаток (относительное движение), что в сумме определяет абсолютную скорость движения пара, а,

следовательно, его кинетическую энергию. Работа, затрачиваемая на сжатие пара, уменьшается по мере приближения процесса сжатия к изотермическому, поэтому после группы колес применяется промежуточное охлаждение пара в холодильниках.

3.2.5. Спиральные компрессоры

Процесс сжатия в спиральных компрессорах (рисунки 3.16 и 3.17) осуществляется за счет вращения подвижной спирали внутри неподвижной. По сравнению с поршневыми компрессорами спиральные имеют следующие преимущества:

- применение вместо поступательного движения поршня планетарного движения спирали повышает уравновешенность и в целом увеличивает срок службы;

- сокращение рабочих поверхностей трения позволяет значительно сократить число отказов, повысить надежность, моторесурс и срок службы компрессора.

Основной недостаток спиральных компрессоров – высокая стоимость.

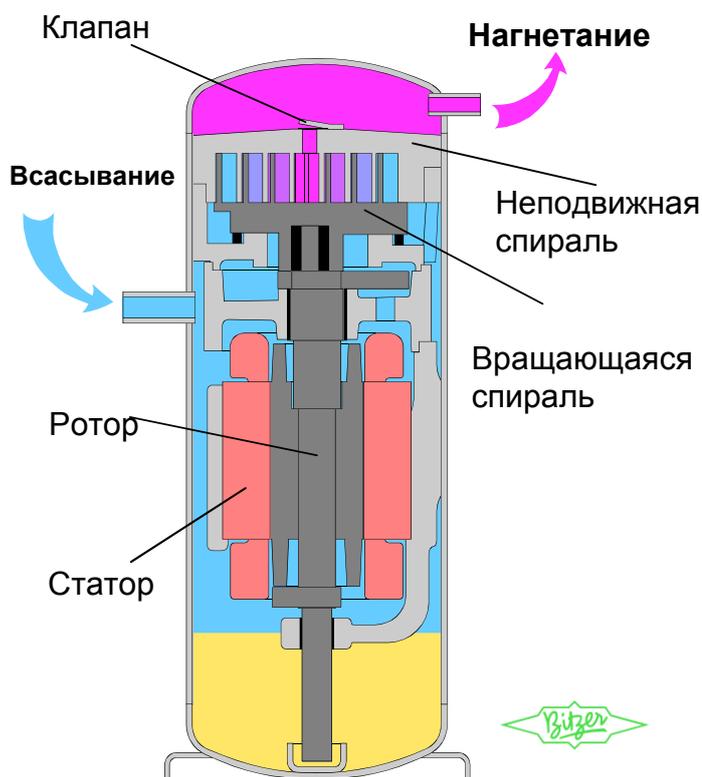
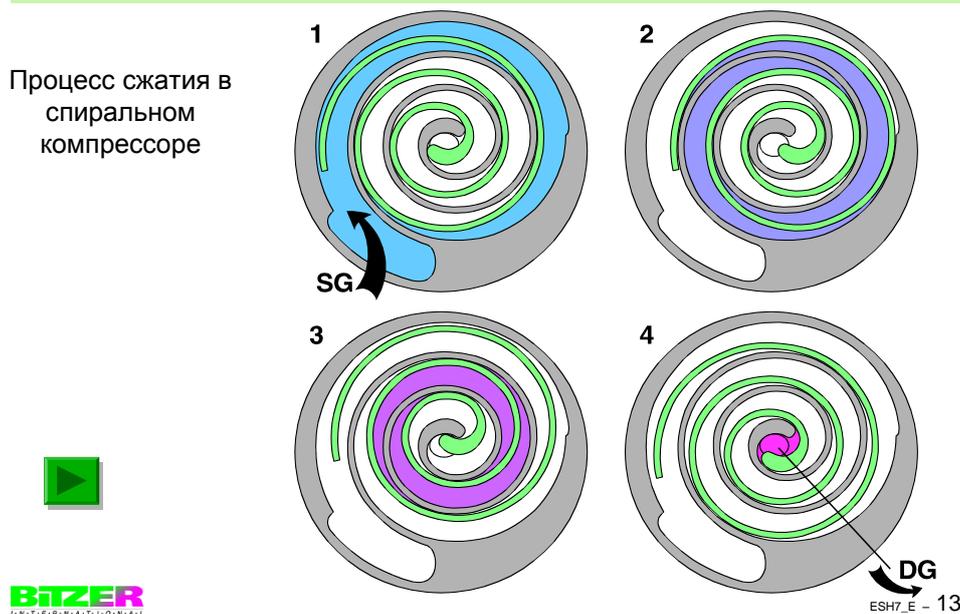


Рисунок 3.16 – Принципиальная схема спирального компрессора

Новая серия спиральных компрессоров Битцер - ESH7



BITZER
CENTREFORONAL

Рисунок 3.17 – Принцип работы спирального компрессора

Контрольные вопросы

1. Как классифицируются компрессоры?
2. Объясните назначение компрессора.
3. В чем преимущества блок-картерных компрессоров перед разъемными?
4. Чем отличаются прямоточные компрессоры от непрямочных?
5. Как маркируются поршневые компрессоры?
6. Опишите принцип действия поршневого компрессора?
7. Что такое индикаторная диаграмма?
8. Чем отличаются теоретическая и рабочая индикаторная диаграмма?
9. Что такое вредное (мертвое) пространство?
10. Что учитывает объемный к.п.д. компрессора?
11. Что такое коэффициент подачи компрессора?
12. Что такое степень сжатия компрессора?
13. Что такое предел сжатия компрессора?
14. Перечислите основные конструктивные узлы и детали поршневых компрессоров. Для чего они предназначены?
15. Как подразделяются поршни компрессоров?
16. Каков принцип действия ротационного компрессора?
17. Каков принцип действия винтового компрессора?
18. Каков принцип действия турбокомпрессора?
19. Каков принцип действия спирального компрессора?

3.3. Теплообменные аппараты холодильных машин

К теплообменным аппаратам относятся конденсаторы, испарители и приборы охлаждения. В конденсаторе сжатые в компрессоре пары хладагента охлаждаются, сжижаются, и образующаяся при этом жидкость незначительно переохлаждается. Испарителями холодильных машин называют аппараты, в которых происходит кипение хладагента за счет теплоты, отводимой от охлаждаемого объема. Испарители могут служить для охлаждения промежуточного хладоносителя (рассола или воды) и для охлаждения воздуха охлаждаемых помещений. В последнем случае они являются приборами охлаждения. К ним относятся воздухоохладители и батареи непосредственного кипения хладагента.

3.3.1. Конденсаторы

Различают следующие типы конденсаторов: кожухотрубные горизонтальные, кожухотрубные вертикальные, испарительные и воздушные.

Кожухотрубный горизонтальный конденсатор (рисунок 3.18) используется в аммиачных и хладоновых холодильных установках пищевых предприятий. Они имеют цилиндрический стальной кожух, в котором прямые трубы (стальные или медные) расположены горизонтально, концы их развальцованы в трубных решетках. Охлаждающая вода под напором проходит по этим трубам. На конденсаторе устанавливают предохранительный клапан, указатель уровня хладагента, вентиль для выпуска воздуха из межтрубного пространства. Пары хладагента конденсируются в межтрубном пространстве на наружной поверхности труб. Эти конденсаторы обычно работают в комплекте с водоохлаждающими устройствами.

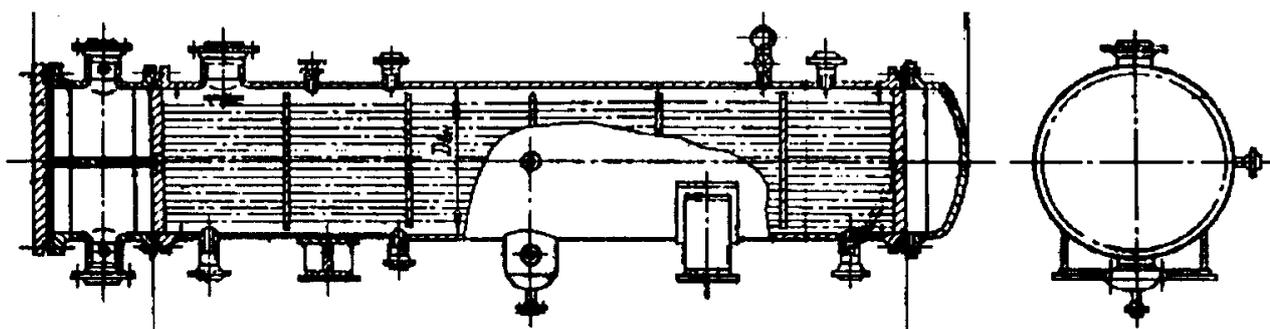


Рисунок 3.18 – Горизонтальный кожухотрубный конденсатор

Вертикальные кожухотрубные конденсаторы используют в крупных аммиачных холодильных установках. Главный их недостаток – сложность равномерного распределения воды по трубам.

Испарительные конденсаторы (рисунок 3.19) применяют на пищевых предприятиях. В этих конденсаторах теплота от хладагента передается через стенку трубы воде, стекающей тонкой пленкой по наружной поверхности труб, и далее воздуху посредством испарения части воды.

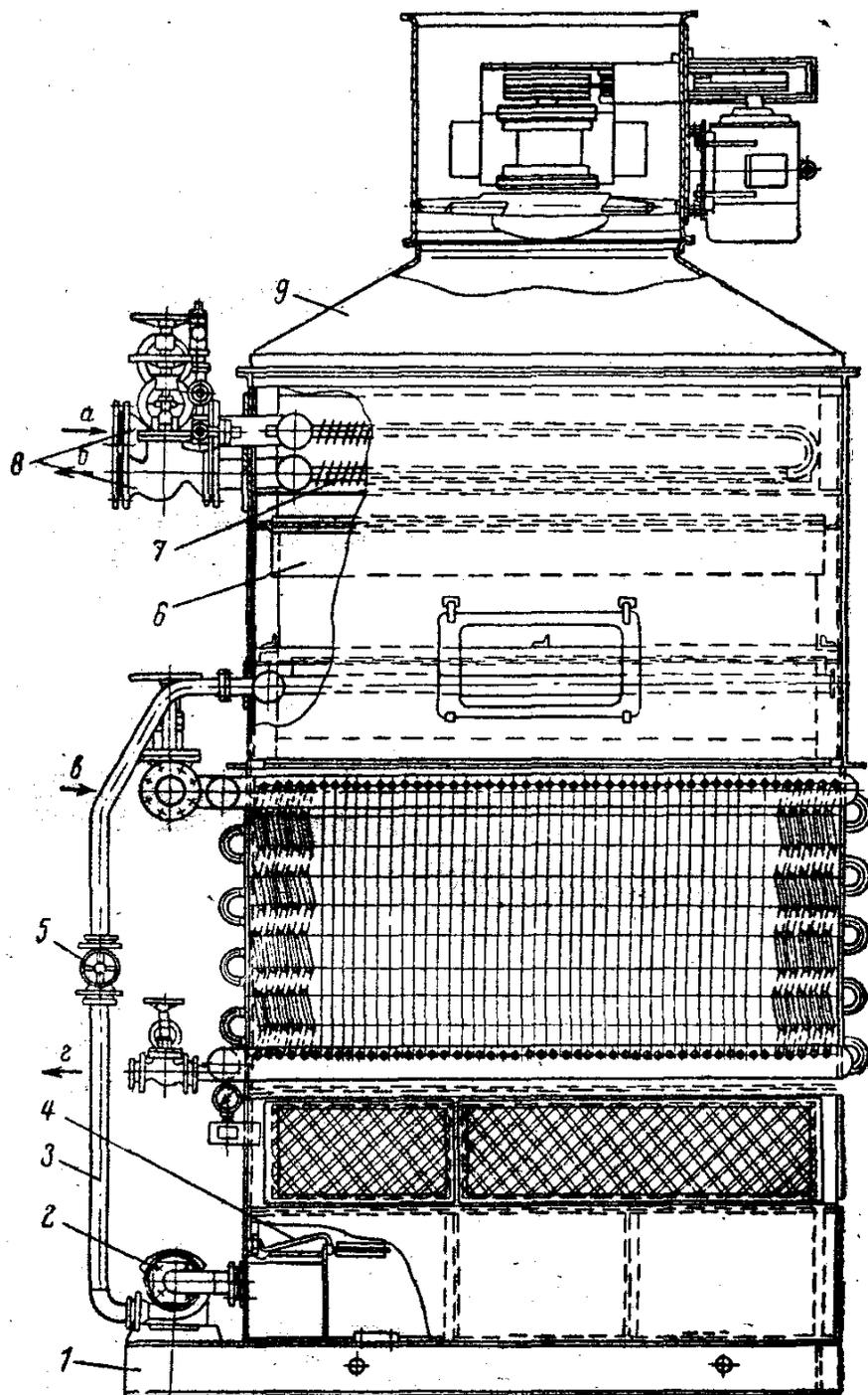


Рисунок 3.19 – Испарительный конденсатор:

1 – каркас; 2, 3 – трубы; 4 – клапан; 5 – регулировочный вентиль; 6 – отбойники для отделения капель воды от воздуха; 7 – форконденсатор для отвода теплоты воздухом; 8 – вентили; 9 – конус для отсасывания воздуха.

Конденсатор представляет собой закрытый корпус. Под конденсатором располагается водяной бак, куда вода сливается самотеком. Из водяного бака циркулирующая вода снова нагнетается насосом в водяной коллектор (оросительную систему). Сверху вентилятором подается поток воздуха, который усиливает испарение воды и служит приемником теплоты водяного пара. Эти конденсаторы эффективны в районах с сухим и жарким климатом.

Воздушные конденсаторы широко используют в агрегатах, обслуживающих торговое оборудование, в бытовых холодильниках, в изотермическом транспорте. Применение их позволяет уменьшить расход воды, сократить затраты на сооружение устройств для охлаждения оборотной воды.

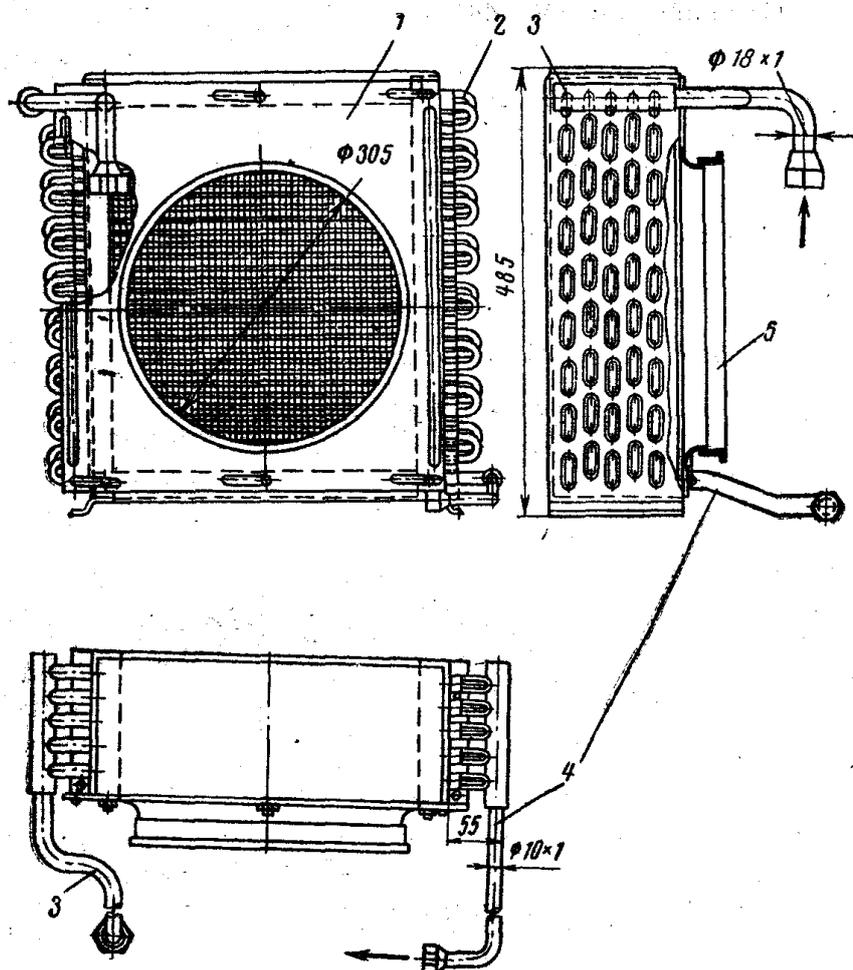


Рисунок 3.20 – Воздушный конденсатор:

1 – кожух; 2 – змеевик; 3 – верхний коллектор для подачи пара; 4 – нижний коллектор для отвода конденсата; 5 – отверстие для вентилятора.

Воздушные конденсаторы представляют собой систему трубчатых змеевиков, расположенных в металлическом корпусе. Хладагент проходит внутри змеевиков, с наружных ребренных поверхностей которых осуществляется съем теплоты естественной или принудительной конвекцией движения воздуха. Ребра труб змеевиков пластинчатые или проволочные, но иногда для устранения контактного сопротивления теплопередачи между трубой и ребрами воздушные конденсаторы изготавливают с литыми ребрами.

3.3.2. Испарители

Испарители – это теплообменные аппараты, в которых происходит теплообмен между охлаждаемой средой и кипящим хладагентом. При этом темпе-

ратура охлаждаемой среды понижается или поддерживается на определенном уровне, а хладагент меняет фазовое состояние.

Испарители классифицируют по следующим признакам:

- по виду хладагента: хладоновые, аммиачные;
- по виду охлаждаемой среды: для охлаждения воздуха, промежуточного хладоносителя, воды;
- по конструктивному исполнению: кожухотрубные, листотрубные, кожухозмеевиковые и др.;
- по циркуляции охлаждающей среды: с естественной и принудительной циркуляцией;
- по характеру заполнения жидким хладагентом: сухого типа и затопленного.

По конструкции кожухотрубный испаритель подобен горизонтальному кожухотрубному конденсатору. Хладоноситель циркулирует в трубах, а в межтрубном пространстве испарителя кипит хладагент.

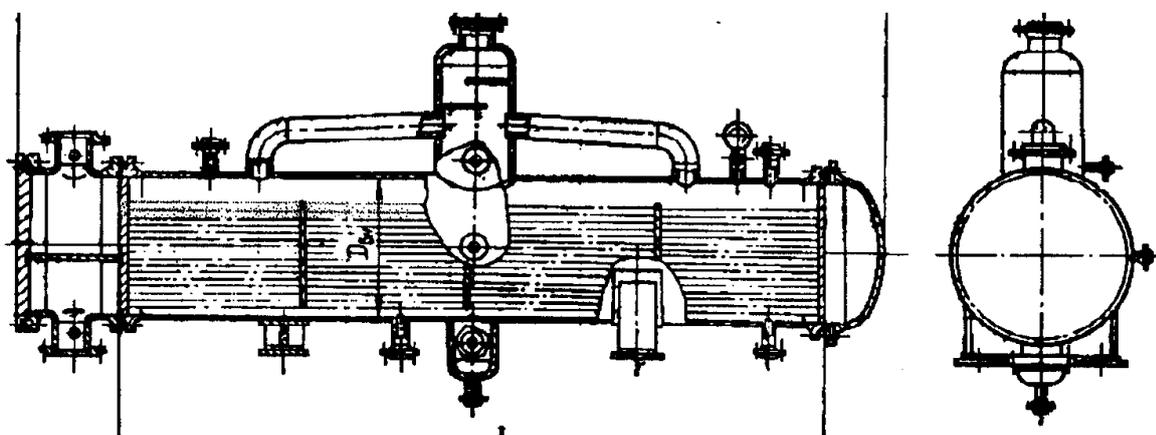


Рисунок 3.21 – Горизонтальный кожухотрубный испаритель

Испарители изготавливают с закрытой и открытой циркуляцией охлаждаемой жидкости.

Испарители с закрытой циркуляцией выполняются кожухотрубными. Охлаждаемая жидкость протекает в них под напором, который создает насос.

В испарителях с открытой циркуляцией трубы, по которым протекает кипящий хладагент, погружаются в охлаждаемую жидкость, наливаемую в баки. Испарители с открытой циркуляцией - панельные. В них жидкость перемешивается мешалкой. Панельный испаритель выполнен в виде прямоугольного бака, в котором помещаются испарительные секции панельного типа.

Панельные испарители (рисунок 3.22) поставляются в комплекте с отделителями жидкости. При использовании в качестве хладоносителя ледяной воды панельные испарители можно использовать как испарители-аккумуляторы, которые применяются на молочных предприятиях для сглаживания неравномерности тепловой нагрузки.

Если жидкий хладагент подается снизу в испаритель, а пары отсасываются сверху, то это испаритель затопленного типа, так как поверхность труб соприкасается с жидким хладоном.

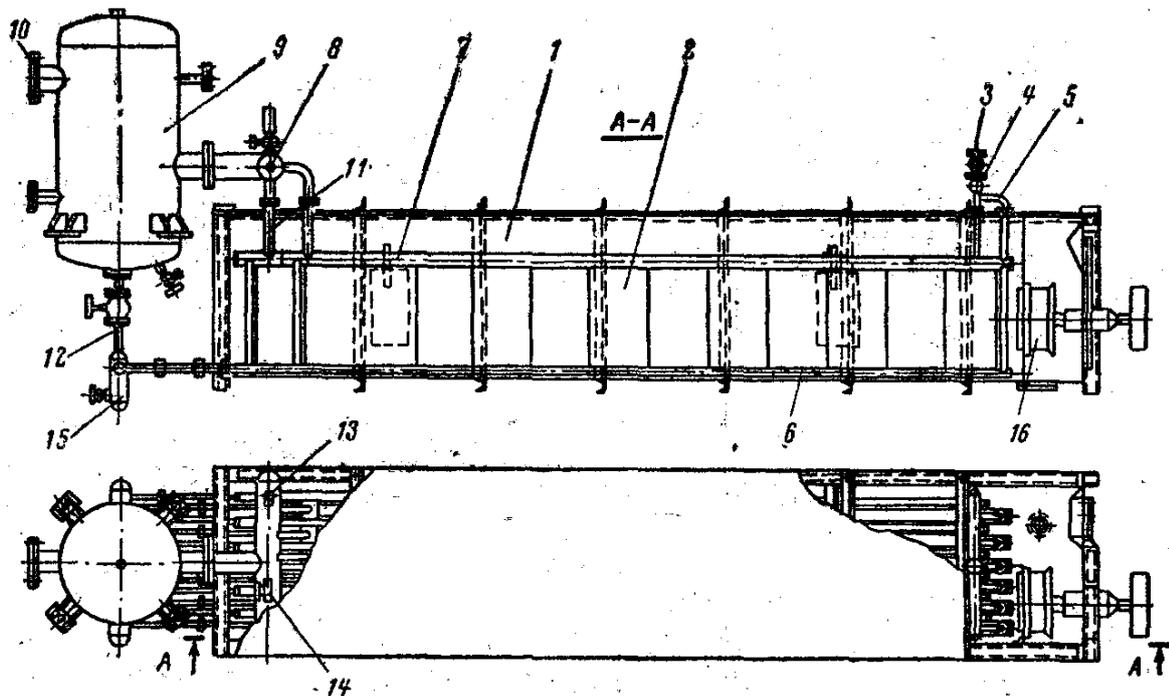


Рисунок 3.22 – Панельный испаритель:

1 – бак; 2 – панели; 3 – вентиль для жидкого хладагента; 4 – распределительный коллектор; 5 – труба; 6 – нижний коллектор; 7 – верхний коллектор для пара хладагента; 8 – сборный коллектор; 9 – отделитель жидкости; 10 – патрубок для отвода пара.

Если жидкий хладагент подается в испаритель сверху, а отсасывается компрессором снизу – сухого типа, так как часть труб не покрыта хладагентом.

3.3.3. Охлаждающие приборы

Охлаждающие приборы (батареи) (рисунки 3.23 и 3.24) подразделяют на приборы непосредственного кипения и с промежуточным хладоносителем (рас-солные). Наружная поверхность труб может быть гладкой или оребренной. Распространены воздухоохладители из оребренных труб или пластин с каналами, внутри которых кипит хладагент или циркулирует хладоноситель. Воздух продувается с помощью вентилятора. Разность температур воздуха и поверхности охлаждения может достигать 12°C .

Воздухоохладители бывают постаментные (рисунок 3.25) и подвесные (рисунок 3.26) и компонуются из секций-модулей. Подвесные воздухоохладители обозначаются: ВОП-50, ВОП-75, ВОП-100, ВОП-150.

Буквы ВО означают воздухоохладитель, П - подвесной, цифры - теплопередающую поверхность (в м^2). Производительность ВОП от 5,8 до 17,4 кВт. Для оттаивания инея в этих воздухоохладителях предусмотрены электронагреватели – ТЭНы мощностью от 8,7 до 12 кВт.

Помимо ВОП, выпускают воздухоохладители ВОГ-230, в которых воздух перемещается горизонтально осевым вентилятором. Батареи ВОГ-230 выполняют из тех же секций, что и ВОП. Оттаивание таких воздухоохладителей происходит с помощью горячих паров аммиака или электронагревателей мощностью 25 кВт. Подвесные воздухоохладители применяют в холодильных камерах молочных заводов и на мясокомбинатах для охлаждения и замораживания пищевых продуктов. Для охлаждения камер длительного хранения мороженых грузов используют панельные батареи, представляющие собой стальные листы, к которым приваривают цельнотянутые трубы.

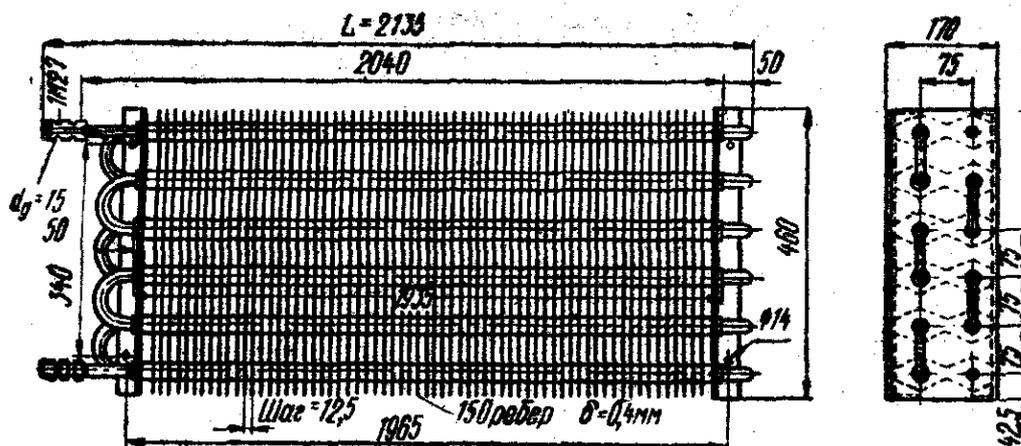


Рисунок 3.23 – Пристенная оребренная батарея

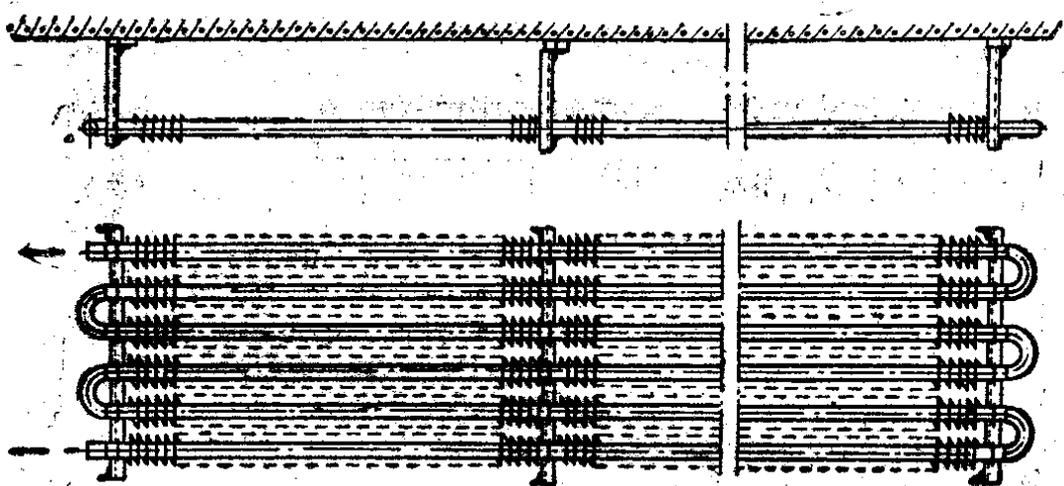


Рисунок 3.24 – Потолочная оребренная батарея

Хладонные потолочные и пристенные батареи из оребренных красно-медных труб применяют в небольших холодильных установках. В бытовых холодильниках, льдогенераторах кубикового льда и некоторых видах торгового холодильного оборудования применяют листотрубные испарители. Их изготавливают электросваркой листов с выштампованными канавками или гидравлической раздачей канавок в плоских сваренных между собой листах.

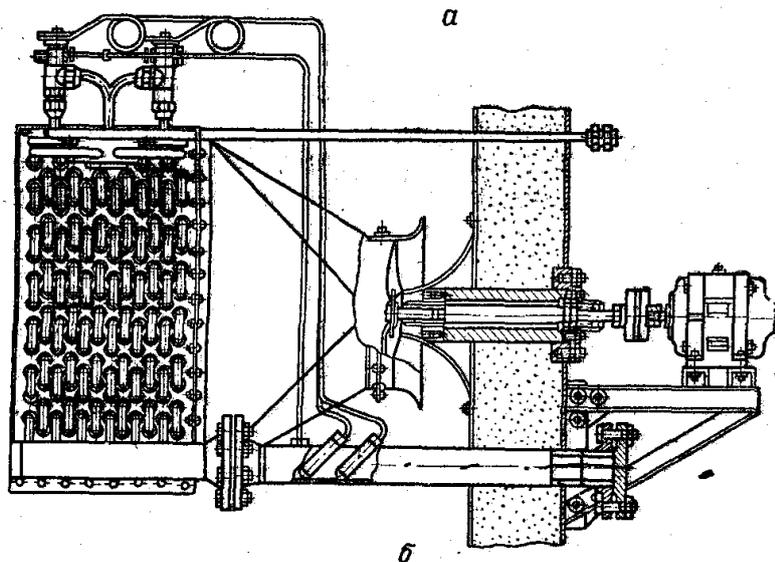
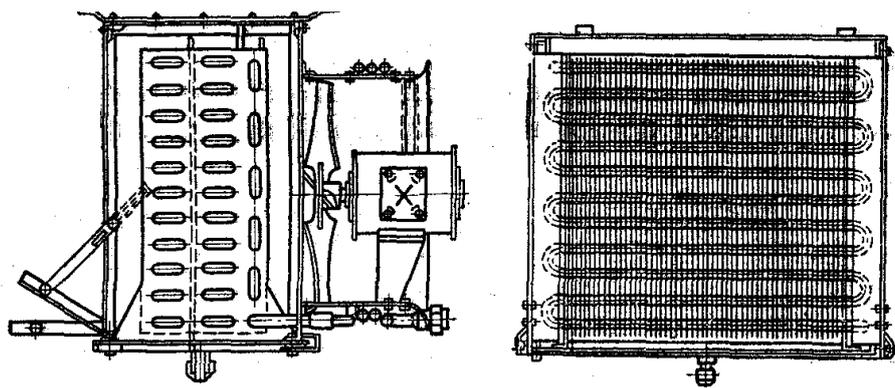


Рисунок 3.25 – Постаментные воздухоохладители:
 а – со встроенным электродвигателем; б – с вынесенным электродвигателем.

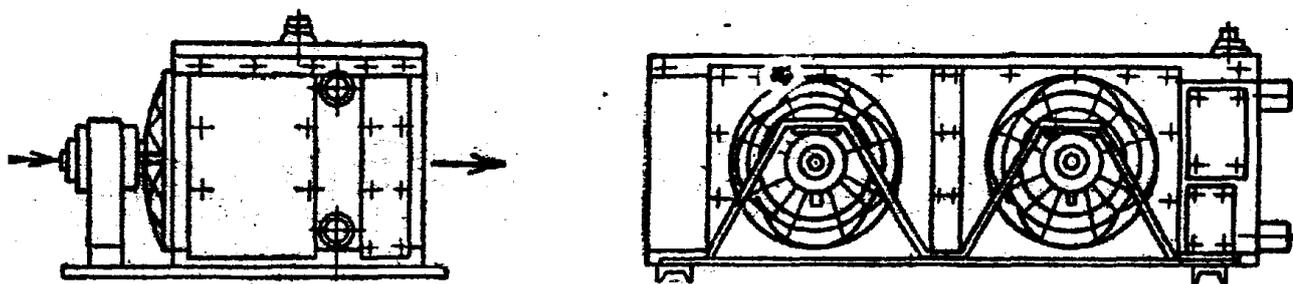


Рисунок 3.26 – Подвесной воздухоохладитель

3.4. Вспомогательное оборудование холодильных машин и установок

К вспомогательному оборудованию относятся отделители жидкости, маслоотделители, промежуточные сосуды и ресиверы. Они обеспечивают стабильность и безопасность работы холодильных установок.

Отделители жидкости предназначены для улавливания капель жидкости, которые содержатся в парожидкостной смеси хладагента, поступающего из испарителей. Тем самым они защищают компрессор от опасного режима работы при попадании в цилиндр жидкости вместе с паром хладагента, обеспечивают сухой ход компрессора, приближая тем самым режим холодильной машины к расчетному. Капли жидкости осаждаются в этих аппаратах вследствие резкого уменьшения скорости и изменения направления движения потока парожидкостной смеси на 90° или 180° .

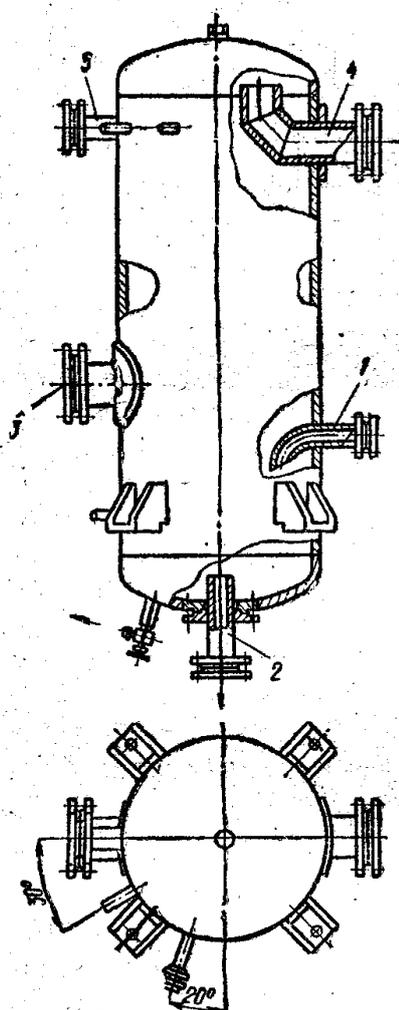


Рисунок 3.27 – Отделитель жидкости

Аммиачные отделители жидкости обозначают 125 ОЖ^г, 150 ОЖ^г, 200 ОЖ^г, 250 ОЖ^м, 300 ОЖ^м (О - отделитель, Ж - жидкость, г - условное обозначение, м - с обогревом зоны маслосбора, цифры перед буквами - размеры входного и выходного паровых патрубков).

Отделители жидкости устанавливают только на панельных испарителях и в некоторых системах охлаждения фруктохранилищ. При использовании охлаждающих систем с принудительной циркуляцией хладагента жидкость отделяется в циркуляционном ресивере.

Маслоотделители предназначены для отделения масла, уносимого хладагентом из компрессора. Масло увлекается хладагентом как в виде капель, так и в парообразном состоянии. Уменьшение масляной пленки приводит к повышению эффективности теплообменных аппаратов. Маслоотделители подразделяются на промывные и инерционные.

В **промывных маслоотделителях** пар проходит через слой жидкого хладагента. При этом он охлаждается в результате испарения части жидкости и освобождается от масла. Степень отделения от масла составляет 85...90%.

В **инерционных маслоотделителях** происходит инерционное отделение масляных капель в результате резкого изменения скорости и направления потока, а также действия центробежной силы. Степень отделения масла в таких маслоотделителях доходит до 80%.

Маслоотделитель представляет собой сварной вертикальный сосуд, заполненный до определенного уровня жидким аммиаком, через который проходят пары аммиака. Очистившись от масла, пары аммиака выводятся из сосуда. Обозначения промывных отделителей: 50 ОММ...300 ОММ (О - отделитель, М - масло, М - модернизированный, цифры перед буквами означают диаметр условного прохода входного и выходного патрубков).

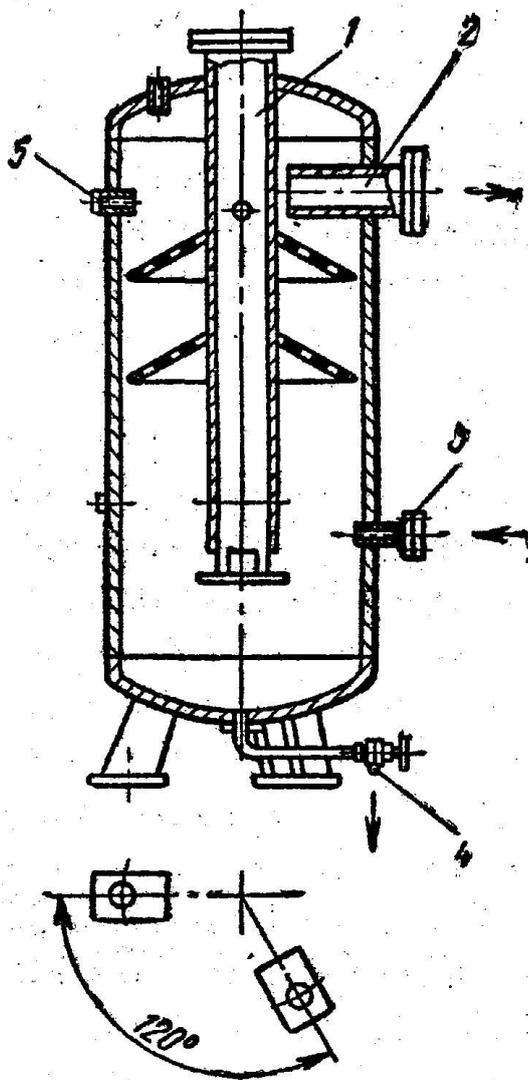


Рисунок 3.28 – Промывной маслоотделитель

Промежуточные сосуды используют в аммиачных холодильных установках двухступенчатого сжатия для полного промежуточного охлаждения паров хладагента, поступающего из компрессора ступени низкого давления, и для переохлаждения жидкого аммиака в змеевике аппарата перед редукционным вентилем (рисунок 3.29). Охлаждение паров хладагента осуществляется путем барботирования их через слой жидкого аммиака. Промежуточный сосуд типа ПСз (П - промежуточный, С - сосуд, з - змеевиковый). Он представляет собой вертикальный сосуд со встроенной теплопередающей поверхностью, выполненной в виде змеевика, который укреплен на днище сосуда. Сосуд заполняется жидким аммиаком так, чтобы змеевик был полностью погружен в него. Промежуточный сосуд отделяет также масло после ступени низкого давления. Для периодического слива масла в промежуточном сосуде предусмотрен трубопровод с вентилем.

Ресиверы представляют собой герметичные цилиндрические сосуды, которые служат емкостью для жидкого хладагента. Различают линейные, дренажные, циркуляционные и защитные ресиверы. По конструкции они бывают вертикальные и горизонтальные (рисунок 3.30).

Линейные ресиверы предназначены для компенсации различия в заполнении испарительного оборудования жидкостью при изменении тепловой нагрузки. Они освобождают конденсатор от жидкости и создают равномерный поток жидкого хладагента к редукционному вентилю. Линейный ресивер устанавливают между конденсатором и редукционным вентилем. Постоянно поддерживаемый уровень жидкого хладагента является гидравлическим затвором,

который препятствует перетеканию пара высокого давления в испаритель. Линейный ресивер является хорошим сборником воздуха и масла.

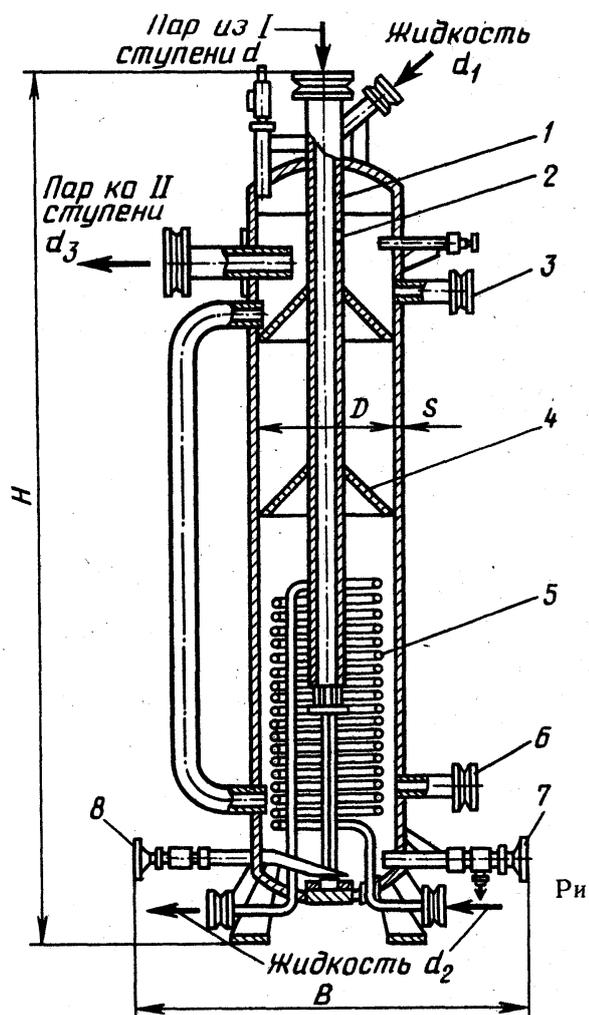


Рисунок 3.29 – Промежуточный сосуд со змеевиком:

- 1 – входная труба; 2 – уравнильное отверстие;
- 3 – патрубок для пара к приборам;
- 4 – конусный отбойник; 5 – змеевик;
- 6 – патрубок для жидкости к приборам;
- 7 – вентиль для сброса жидкости; 8 – вентиль для спуска масла.

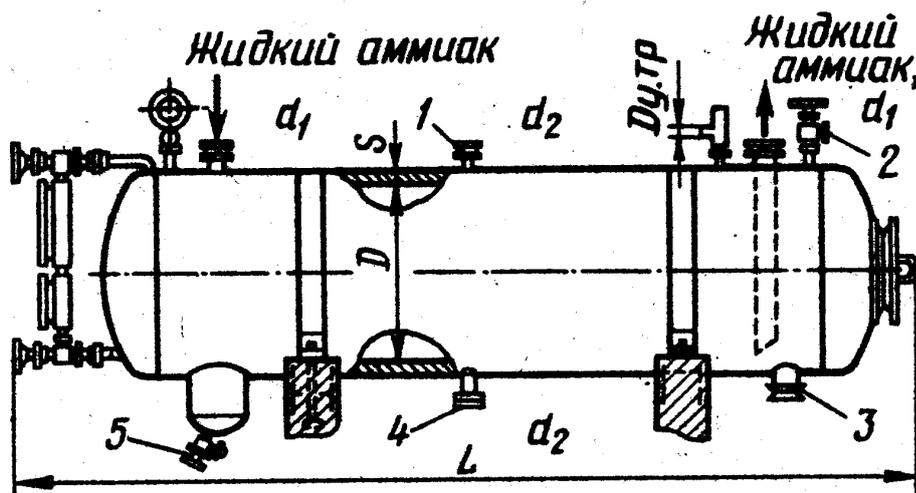


Рисунок 3.30 – Горизонтальный ресивер

Дренажные ресиверы служат для слива жидкого хладагента из аппаратов и трубопроводов холодильной установки при профилактике и ремонте.

Циркуляционные ресиверы используют в насосно-циркуляционных схемах питания испарительных систем жидким хладагентом. Они являются резервуаром, постоянно содержащим жидкий хладагент в количестве, обеспечивающем непрерывную работу циркуляционного насоса, подающего жидкость в испарители. Ресиверы устанавливают на стороне низкого давления ниже отметки, на которой размещается все оборудование испарительной системы. Это обеспечивает свободный слив жидкости из испарителей и отделителей жидкости.

Защитные ресиверы вместе с отделителем жидкости, который устанавливают на всасывающем трубопроводе между испарителями и компрессором, служат для защиты компрессоров от гидравлических ударов.

Применяют их в безнасосных системах питания испарителей жидким хладагентом. Горизонтальные ресиверы типа РД (Р - ресивер, Д - дренажный). Ресиверы РД используют как линейные, дренажные, циркуляционные и защитные. Ресиверы РДВ (В - вертикальный) - как циркуляционные и защитные.

Насосы холодильных установок предназначены для циркуляции охлаждающей воды в оборотных системах водоснабжения, промежуточного хладоносителя (рассол или ледяная вода), а также жидкого аммиака в насосно-циркуляционных системах. Для жидкого аммиака применяют специальные аммиачные бессальниковые насосы.

Переохладители в аммиачных машинах не всегда обязательны. В виде отдельного аппарата их применяют только на больших холодильных установках и особенно на тех, которые снабжены оросительными конденсаторами.

Теплообменники для хладоновых машин всегда необходимы. Они нужны не только для переохладения жидкого хладагента, но и для перегрева парообразного хладона, поступающего из испарителя в компрессор.

Теплообменник представляет собой цилиндрический стальной сварной кожух с приваренными к его торцам сферическими днищами. Внутри кожуха помещен змеевик из медной трубки. Концы змеевика выведены из кожуха через отверстия в днищах. Жидкий хладон проходит через теплообменник внутри змеевика, а парообразный – в кожухе, омывая наружную поверхность змеевика. Движение жидкости и пара осуществляется противотоком.

В малых холодильных машинах, применяемых для бытовых холодильников, функцию теплообменника выполняют спаянные между собой на некотором участке трубки: капиллярная, по которой жидкий хладагент направляется к испарителю, и всасывающая, по которой проходит в противоположном направлении пар хладагента из испарителя к компрессору.

3.5. Автоматизация холодильных установок

Автоматизация холодильных установок предполагает оснащение объектов автоматизации (элементов холодильных установок) автоматическими устройствами (приборами и средствами автоматизации), с помощью которых обеспечивается безопасная работа холодильных установок и проведение произ-

водственного процесса или отдельных операций без непосредственного участия обслуживающего персонала или с частичным его участием.

Объекты автоматизации совместно с автоматическими устройствами образуют системы автоматизации, которые могут выполнять различные функции: контроля, сигнализации, защиты, регулирования и управления.

Автоматизация повышает экономическую эффективность работы холодильных установок, так как уменьшается численность обслуживающего персонала, снижается расход электроэнергии, воды и других материалов, увеличивается срок службы холодильных установок вследствие поддержания автоматическими устройствами оптимального режима их работы.

Автоматизация требует капитальных затрат, поэтому ее уровень надо выбирать, основываясь на результатах технико-экономического анализа. Холодильную установку можно автоматизировать частично, комплексно или полностью.

Частичная автоматизация предусматривает обязательную для всех холодильных установок автоматическую защиту, а также контроль, сигнализацию и нередко управление.

Обслуживающий персонал регулирует контролируемые параметры при отклонении их от заданных значений и при нарушении работоспособности оборудования, о чем информируют системы контроля и сигнализации.

При **комплексной** автоматизации система автоматического регулирования поддерживает основные параметры (температуры и влажности воздуха в камерах, температуры кипения и конденсации хладагента и т.д.), а некоторые вспомогательные периодические процессы (оттаивание инея с поверхности охлаждающих приборов, удаление масла из системы) выполняются вручную.

Полная автоматизация охватывает все процессы, связанные с поддержанием требуемых параметров в охлаждаемых помещениях и элементах холодильной установки. Поэтому обслуживающий персонал может присутствовать периодически. Полной автоматизацией оснащаются небольшие по мощности холодильные установки, имеющие высокие показатели безотказности и долговечности.

Для крупных промышленных холодильных установок более характерна комплексная автоматизация.

Автоматический контроль обеспечивает дистанционное измерение, а иногда и запись параметров, определяющих режим работы оборудования.

Автоматическая сигнализация извещает звуковым или световым сигналом о достижении заданных величин, тех или иных параметров, включении или выключении элементов холодильной установки. Ее подразделяют на технологическую, предупредительную и аварийную.

Технологическая сигнализация – световая, информирует о работе компрессоров, насосов, вентиляторов, о наличии напряжения в электрических цепях.

Предупредительная сигнализация, предусматриваемая на защитных и циркуляционных ресиверах, информирует о том, что величина контролируемого параметра приближается к предельно допустимому значению.

Аварийная сигнализация световым и звуковым сигналами извещает о том, что сработала аварийная защита.

Автоматическая защита, создающая безопасность условий труда для обслуживающего персонала, обязательна для любого производства. Она предотвращает возникновение аварийной ситуации, выключая отдельные элементы или установку в целом, когда контролируемый параметр достигает предельно допустимой величины. Надежную защиту в случае возникновения опасной ситуации должна обеспечивать система автоматической защиты (САЗ).

В простейшем варианте САЗ состоит из датчика-реле (реле защиты), контролирующего величину параметра и вырабатывающего сигнал при достижении им предельно допустимой величины, а также устройства, преобразующего сигнал реле защиты в сигнал остановки, который направляется в систему управления.

На холодильных установках большой мощности САЗ выполняют так, чтобы после срабатывания реле защиты автоматический пуск отказавшего элемента без устранения вызвавшей остановку причины был невозможен. На небольших холодильных установках, например, на предприятиях торговли, где авария не может привести к тяжелым последствиям, нет постоянного обслуживания, отказавший объект включается автоматически, если величина контролируемого параметра возвращается в допустимую область.

Разновидностью защиты можно считать блокировку, когда, например, компрессор может быть включен только если включен хотя бы один водяной насос, подающий воду в конденсатор, и рассольный насос для системы с промежуточным хладоносителем.

Наибольшее число видов защиты имеют компрессоры, поскольку по опыту эксплуатации 75% всех аварий на холодильных установках происходит именно с ними.

Количество параметров, контролируемых САЗ, зависит от типа, мощности компрессора и вида холодильного агента.

Виды защиты компрессоров:

- защита от недопустимого повышения давления нагнетания, которая предотвращает нарушение плотности соединений или разрушение элементов;
- защита от недопустимого понижения давления всасывания, предотвращающая повышение нагрузки на сальник компрессора, вспенивание масла в картере, замерзание хладоносителя в испарителе.

Реле давления (высокого и низкого) оснащают практически все компрессоры;

- защита от уменьшения разности давлений (до и после насоса) в масляной системе, предотвращающая аварийный износ трущихся деталей и заклинивание механизма движения компрессора. Реле разности давлений контролирует разность давлений на стороне нагнетания и всасывания масляного насоса;

- защита от недопустимого повышения температуры нагнетания, предотвращающая нарушение режима смазки цилиндра и аварийный износ трущихся деталей;

- защита от недостаточной подачи воды в охлаждающую рубашку поршневого аммиачного компрессора, предохраняющая цилиндры компрессора от перегрева;

- защита от повышения температуры обмоток встроенного электродвигателя герметичных и бессальниковых хладоновых компрессоров, предотвращающая перегрев обмоток, заклинивание ротора и работу на двух фазах;

- защита от гидравлического удара (попадание жидкого хладагента в полость сжатия), предотвращающая серьезную аварию поршневого компрессора, – нарушение плотности, а иногда и разрушение.

Виды защиты других элементов холодильной установки:

- защита от замерзания хладоносителя, предотвращающая разрыв труб испарителя;

- защита от переполнения линейного ресивера, предохраняющая установку от снижения эффективности конденсатора в результате заполнения части его объема жидким хладагентом;

- защита от опорожнения линейного ресивера, предотвращающая прорыв пара высокого давления в испарительную систему и опасность гидравлического удара.

Предотвращение аварийной ситуации обеспечивает защита от недопустимой концентрации аммиака в помещении, способной привести к возникновению пожара и взрыва. Содержание аммиака в воздухе контролирует газоанализатор, установка которого должна быть на значении $1,5 \text{ г/м}^3$ (0,021% по объему).

Автоматическое регулирование. Автоматическое регулирование обеспечивает поддержание в определенных пределах параметров, характеризующих работоспособность холодильной установки. Системы автоматического регулирования и управления позволяют осуществлять производственный процесс без обслуживающего персонала.

В холодильной установке с одной испарительной системой достаточно регулировать температуру и влажность воздуха в охлаждаемой камере, и перегрев пара, всасываемого в компрессор.

Регулирование перегрева пара, выходящего из испарителя, обеспечивает эффективность передачи теплоты в испарителе и безопасность работы компрессора. Автоматическое регулирование перегрева пара (рисунок 3.31) осуществляется путем плавного изменения подачи хладагента в испаритель с помощью терморегулирующего вентиля (ТРВ). ТРВ устанавливаются на трубопроводе, по которому жидкий хладагент поступает в испаритель. Чувствительный элемент (датчик) ТРВ размещают на трубопроводе, по которому отводится пар из испарителя.

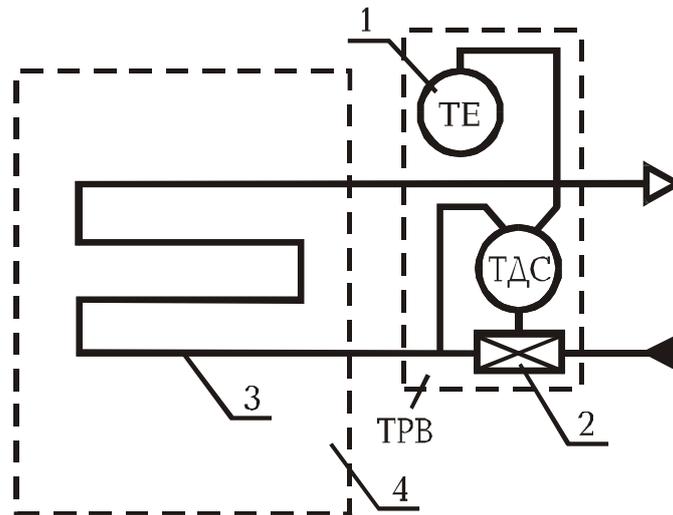


Рисунок 3.31 – **Схема регулирования перегрева с помощью ТРВ:**
 1 – датчик; 2 – регулирующий орган; 3 – испаритель; 4 – камера.

Если испаритель заполнен жидким хладагентом, то из него выходит насыщенный пар, температура которого равна температуре кипения. Регулирующий орган ТРВ закрывается. Если из испарителя выходит пар, перегрев которого превышает установку ТРВ, то регулирующий орган ТРВ должен быть открыт настолько, чтобы площадь его проходного сечения соответствовала допустимой величине перегрева.

Регулирование температуры охлаждаемого объекта. Температуру объекта регулируют путем изменения производительности холодильной установки, в первую очередь испарителя и компрессора. При наличии одного объекта изменяют холодопроизводительность компрессора. В простейшем случае регулирование осуществляют ступенчато путем пуска и остановки поршневых компрессоров. В поршневых компрессорах последних модификаций имеется устройство для ступенчатого изменения его производительности посредством отключения цилиндров.

Производительность поршневых компрессоров можно регулировать и плавным изменением частоты вращения вала компрессора, дросселированием всасываемого в компрессор пара, перепуском пара со стороны нагнетания на линию всасывания, перепуском пара из цилиндра в полость всасывания. Производительность винтовых компрессоров можно изменять практически плавно.

Специальный золотник, встроенный в компрессор, при перемещении уменьшает или увеличивает зону сжатия хладагента винтами и тем самым изменяет зависящую от зоны производительность.

На рисунке 3.32 приведены схемы регулирования температуры воздуха в камере с помощью реле температуры и реле давления.

Датчик 1 реле температуры 2 (рисунок 3.32.а) ощущает изменение температуры воздуха, датчик 1 реле давления 2 воспринимает давление кипения, и реле заданной установки дает команду магнитному пускателю 3 в зависимости от ситуации на пуск или остановку электродвигателя 4 компрессора 5.

Реле давления (рисунок 3.32.б) обеспечивает меньшую точность регулирования и применяется в некоторых типах торгового холодильного оборудования, где продукты хранят непродолжительное время и не требуется высокая точность поддержания температуры.

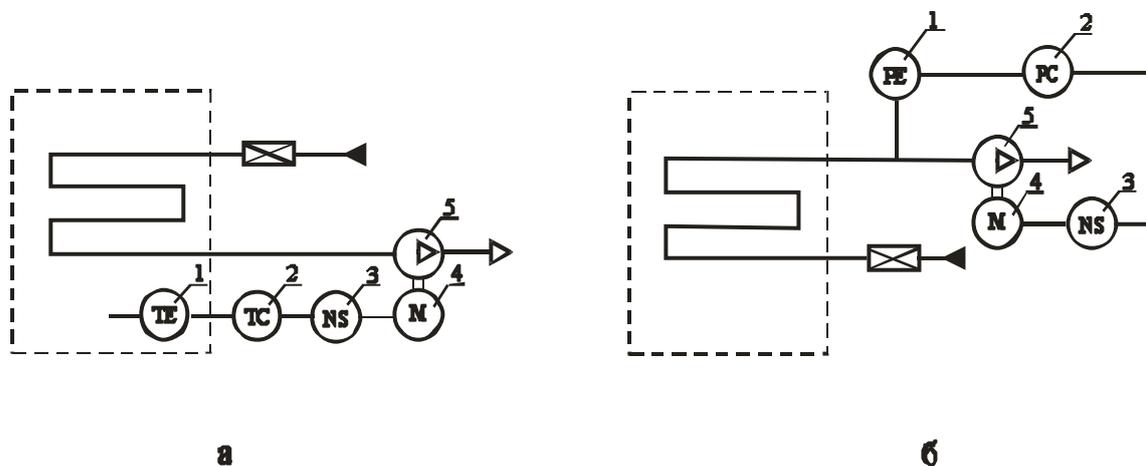


Рисунок 3.32 – Схема регулирования температуры воздуха в камере:
 а – с помощью реле температуры; б – с помощью реле давления;
 1 – датчик; 2 – реле; 3 – магнитный пускатель; 4 – электродвигатель; 5 – компрессор.

Циклической работе компрессора соответствует периодическое изменение температуры кипения, конденсации хладагента и воздуха в помещении.

В установках с несколькими охлаждаемыми объектами, подключенными к испарительной системе с одним или несколькими компрессорами, температура воздуха в камере объекта и перегрев пара, выходящего из испарителя, регулируются с помощью реле температуры и ТРВ, изменяющих холодопроизводительность испарителя (рисунок 3.32). По мере уменьшения теплопритока в охлаждаемых объектах в них будут выключаться реле температуры и возникает необходимость изменять производительность компрессоров. На небольших холодильных установках система автоматического управления выключает один из компрессоров или компрессор, если он один, и включает его при включении одного из объектов.

Регулирование влажности воздуха в камере возможно путем изменения влагопритока и влагоотвода. Влагоотвод осуществляется вследствие конденсации водяного пара из воздуха на поверхности испарителя. При уменьшении влажности воздуха, что устанавливается специальными приборами, увеличивается влагоприток путем подачи влажного воздуха, водяного пара или воды в распыленном состоянии.

Автоматическое управление обеспечивает выполнение ряда запрограммированных операций по сигналу. Например, при пуске поршневого компрессора автоматически отжимаются пластины всасывающих клапанов, открываются соленоидные вентили на трубопроводах подачи воды для охлаждения компрессора и хладагента в испаритель.

Контрольные вопросы

1. Что относится к теплообменным аппаратам холодильных установок?
2. Какие конденсаторы применяются в холодильных установках?
3. Что называется охлаждающими приборами?
4. Что относится к вспомогательному оборудованию холодильных установок?
5. Для чего необходимо отделение жидкости?
6. Для чего необходимо отделение масла?
7. Для чего предназначены промежуточные сосуды?
8. Какие существуют ресиверы и для чего они предназначены?
9. Для каких холодильных машин необходимы теплообменники и какова их роль?
10. В чем суть автоматизации холодильных установок?
11. Какие виды автоматизации существуют?
12. Перечислите виды защиты компрессоров.
13. Перечислите виды защиты других элементов холодильных установок?
14. В чем назначение автоматического регулирования?

4. ГЛУБОКОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ

Процессы глубокого охлаждения используют главным образом для разделения газовых смесей их сжижением и ректификацией.

Для процессов ректификации необходимо предварительное сжижение газовых смесей, которое следует рассматривать как основное техническое назначение глубокого охлаждения. Сжижение газов возможно различными способами. Важнейший показатель совершенства процессов сжижения газов - затрата работы на сжижение, а эталон сравнения - минимальная работа сжижения.

При сжижении газов реальные процессы охлаждения можно разделить на две группы: каскадное охлаждение с применением промежуточных хладагентов и непосредственное охлаждение. Каскадное охлаждение применяется в основном в лабораторной технике, и поэтому в данном курсе рассматриваться не будет.

4.1. Непосредственное охлаждение

Непосредственное охлаждение газов, сопровождаемое сжижением, может быть осуществлено различными способами, характеризующимися термодинамическим циклом, по которому протекает процесс.

Основными способами (циклами) являются:

- простой регенеративный цикл с изоэнтальпийным расширением сжатого газа;
- регенеративный цикл с изоэнтальпийным расширением и предварительным охлаждением;

- регенеративный цикл с изоэнтروпийным расширением сжатого газа;
- цикл с изоэнтروпийным расширением сжатого газа и низким давлением.

Рассмотрим холодильный цикл, основанный на дросселировании газа, т.е. при изоэнтальпийном расширении (рисунок 4.1.а).

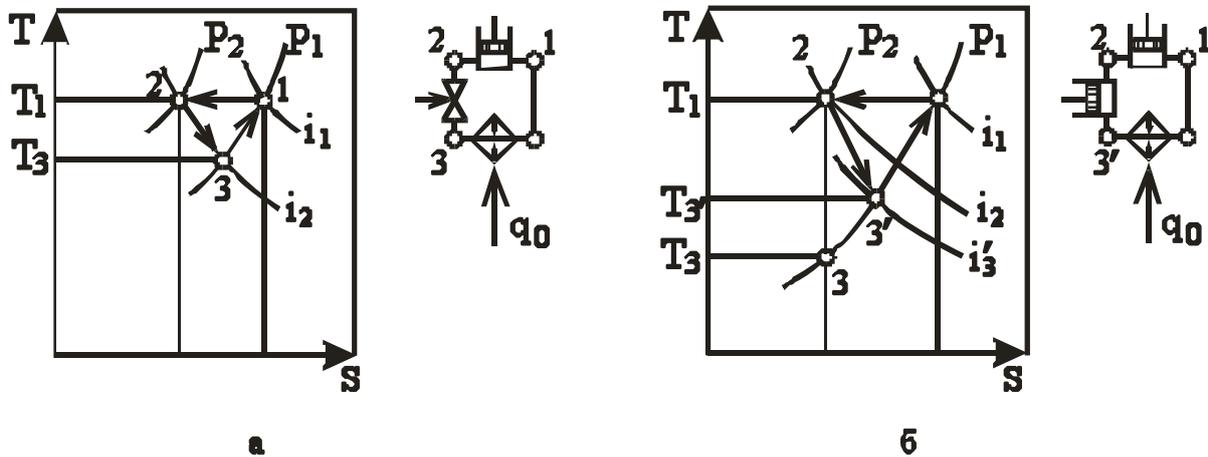


Рисунок 4.1 – Диаграмма холодопроизводительности газа при изоэнтальпийном (а) и изоэнтропийном (б) расширении сжатого газа

Исходный газ давлением p_1 при температуре T_1 изотермически сжимается компрессором до давления p_2 (линия 1-2). Изотермическое сжатие в компрессоре обеспечивается комплектацией его специальным холодильником, который на схеме условно не показан. Далее газ проходит через дросселирующий вентиль, где расширяется до первоначального давления p_1 . При этом температура газа снижается при постоянной энтальпии $i = \text{const}$ (2-3). Охлажденный газ нагревается до первоначальной температуры T_1 , отнимая от охлаждаемой среды количество тепла, равное его холодопроизводительности:

$$q_0 = i_1 - i_2. \quad (4.1)$$

В холодильном цикле, основанном на изоэнтропийном расширении газа, последний также изотермически сжимается компрессором от p_1 до p_2 (линия 1-2). Далее он расширяется в детандере до давления p_1 теоретически при постоянной энтропии $s = \text{const}$ (2-3), охлаждаясь при этом до температуры T_3 , а практически по политропе 2-3', охлаждаясь до температуры T_3' . Охлажденный газ нагревается до первоначальной температуры T_1 (3'-1), отнимая от охлаждаемой среды количество теплоты, равное его холодопроизводительности:

$$q_0 = i_1 - i_3'. \quad (4.2)$$

Прибавляя и отнимая i_2 в правой части этого уравнения, получим:

$$q_0 = (i_1 - i_2) + (i_2 - i_3').$$

Из этого равенства следует, что при изоэнтропийном расширении холодопроизводительность газа больше, чем при изоэнтальпийном на величину $i_2 - i_3'$, т.е. на работу, совершенную детандером.

4.2. Простой регенеративный цикл с изохорным расширением сжатого газа (цикл Линде)

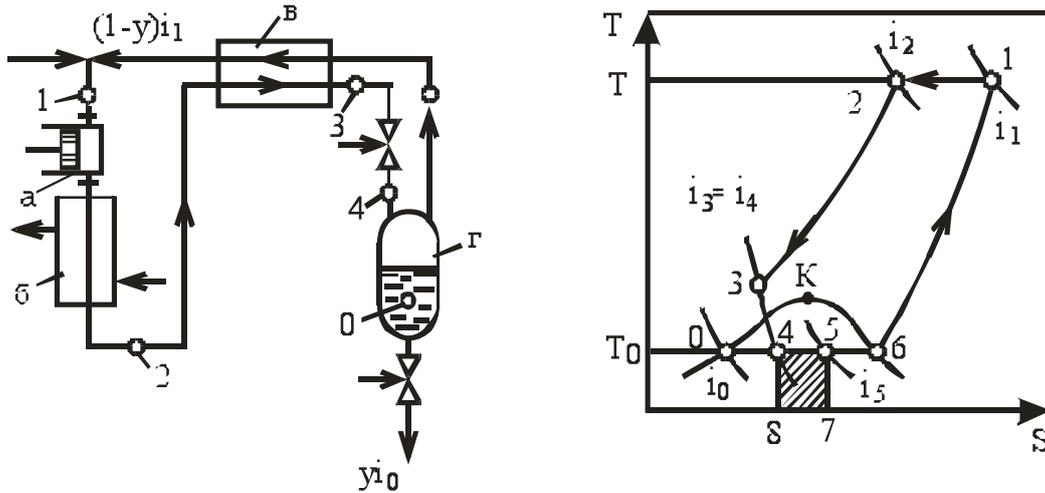


Рисунок 4.2 – Схема установки и цикл Линде:

а - компрессор, б - холодильник компрессора, обеспечивающий изотермическое сжатие, в - теплообменник, г - сборник жидкости.

Исходный газ сжимается (рисунок 4.2 линия 1-2) изотермически при температуре T и затем охлаждается (2-3) при постоянном давлении $p = \text{const}$ за счет холода "обратного" газа. Далее следует дросселирование по линии постоянной энтальпии $i = \text{const}$ (3-4), в результате чего получается смесь пара с жидкостью, причем содержание жидкости в смеси определяется отношением отрезка 4-6 к отрезку 0-6.

Полученные жидкость и пар используют для отнятия теплоты на низшем температурном уровне T_0 от охлаждаемого объема, при этом часть образовавшейся жидкости изотермически испаряется (4-5) и энтальпия смеси возрастает от i_4 до i_5 .

Жидкость и пар (т. 5) направляются в качестве обратного газа в теплообменник для охлаждения сжатого газа. Здесь жидкость испаряется по изотерме 5-6, а образовавшийся сухой насыщенный пар перегревается по изобаре 6-1. Таким образом, при полной рекуперации холода газ возвращается к первоначальному состоянию (т. 1).

От газа высокого давления в теплообменнике отнимается теплота $i_2 - i_3$. Парожидкостная смесь низкого давления воспринимает в теплообменнике теплоту $i_1 - i_5$.

Очевидно, что

$$i_1 - i_5 = i_2 - i_3 = i_2 - i_4. \quad (4.3)$$

Разность энтальпий $i_5 - i_4$, соответствующая заштрихованной площади 8-4-5-7, представляет собой теплоту, воспринимаемую 1 кг парожидкостной смеси при температуре T_0 и расходуемую на испарение части жидкости перед теплообменником. Эта теплота, воспринимаемая на низшем температурном уровне, соответствует холодопроизводительности 1 кг циркулирующего газа.

Из равенства (2.3) следует

$$i_5 - i_4 = i_1 - i_2, \quad (4.4)$$

т.е. холодопроизводительность равна уменьшению энтальпии газа при изотермическом сжатии. Если холодильную машину применяют для сжижения газа, то полученную после дросселирования жидкость отделяют от парожидкостной смеси и отводят из системы.

Обозначим долю газа, охлаждаемую при дросселировании, через y . Тогда тепловой баланс холодильной машины, отнесенный к 1 кг циркулирующего газа, имеет вид:

$$i_2 = yi_0 + (1 - y)i_1, \quad (4.5)$$

где i_2 - энтальпия газа высокого давления на входе в теплообменник, кДж/кг; i_0 - энтальпия отводимой жидкости, кДж/(кг исходного газа); $(1 - y)i_1$ - энтальпия газа низкого давления на выходе из теплообменника кДж/(кг исходного газа).

Из этого выражения находят охлаждаемую долю газа как отношение холодопроизводительности 1 кг газа к количеству теплоты, которое необходимо отвести от 1 кг газа для его сжижения:

$$y = (i_1 - i_2)/(i_1 - i_0). \quad (4.6)$$

В реальных условиях работы холодильной машины холодопроизводительность газа $i_1 - i_2$ уменьшается вследствие потерь холода в окружающую среду $q_{o.c}$ (кДж/кг исходного газа) и за счет недорекуперации в теплообменнике q_n . Суммарные потери холода составляют:

$$\Sigma q = q_{o.c} + q_n.$$

Действительная холодопроизводительность выразится:

$$q_0 = i_1 - i_2 - \Sigma q,$$

а действительная охлаждаемая доля:

$$y_d = (i_1 - i_2 - \Sigma q)/(i_1 - i_0). \quad (4.7)$$

Мощность, затрачиваемая на валу компрессора (Вт), определяется по выражению:

$$L = 1,69G_cRT \ln(p_2/p_1), \quad (4.8)$$

где G_c - массовый секундный расход перерабатываемого газа, кг/с; R - газовая постоянная, Дж/(кг·К); p_1 - давление на входе в компрессор, Па; p_2 - давление после компрессора, Па; T - температура газа, К.

Расход энергии на сжижение газа с применением цикла Линде в несколько раз больше теоретически необходимого, что объясняется необратимым увеличением энтропии при дросселировании сжатого газа.

При снижении температуры газа необратимое изменение энтропии в процессе дросселирования уменьшается, поэтому уменьшаются и энергетические затраты. Для снижения температуры газа перед дросселированием целесообразно дополнительное его охлаждение с помощью парокомпрессионной машины.

4.3. Регенеративный цикл с изохэнтальпийным расширением и предварительным охлаждением газа

Исходный газ (рисунок 4.3) изотермически сжимается (линия 1-2) при температуре T компрессором, изобарически охлаждается (2-3) обратным газом в предварительном теплообменнике до температуры T_1 , после этого он охлаждается (3-4) в холодильнике пароконпрессиионной машины (обычно аммиачном) до температуры T_2 и, наконец, охлаждается обратным газом (4-5) в основном теплообменнике. Обратный газ нагревается (7-1), охлаждая газ высокого давления.

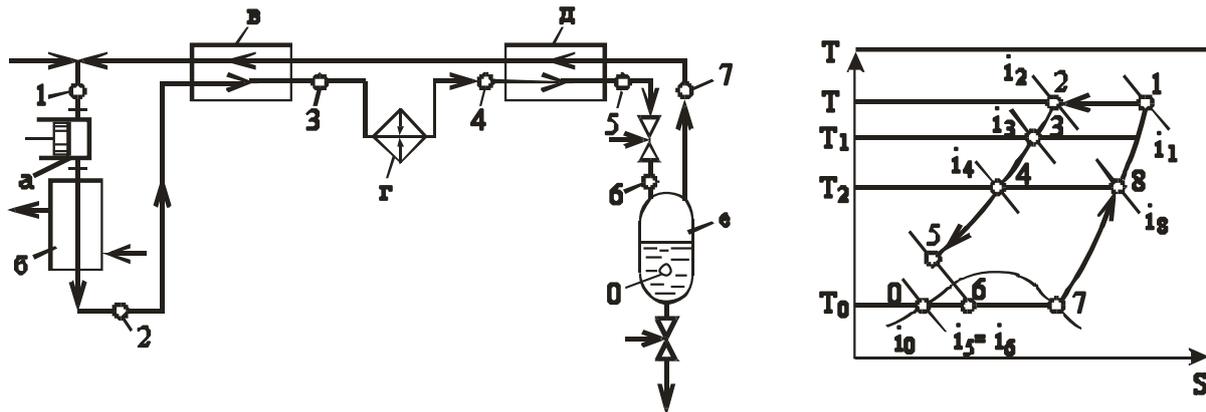


Рисунок 4.3 – Схема установки и цикл с изохэнтальпийным расширением и предварительным охлаждением газа:

a - компрессор; *б* - холодильник компрессора, обеспечивающий изотермическое сжатие; *в* - предварительный теплообменник; *г* - холодильник пароконпрессиионной холодильной машины; *д* - основной теплообменник; *е* - сборник жидкости.

В этом цикле холодопроизводительность 1 кг газа увеличивается по сравнению с холодопроизводительностью при простом цикле на количество холода $i_3 - i_4$, подводимое в аммиачном холодильнике, и составляет теоретически

$$q_0 = (i_1 - i_2) + (i_3 - i_4),$$

а практически меньше на величину потерь Σq .

Действительную ожижаемую долю газа можно определить также, как для простого цикла, но начатого в основном теплообменнике при температуре T_2 и описанного линиями 4-5-6-7-8:

$$y_d = (i_8 - i_4 - \Sigma q) / (i_8 - i_0). \quad (4.9)$$

Удельный расход энергии на сжижение газа можно определить, сложив мощности, затрачиваемые основным и аммиачным компрессорами.

Мощность на валу основного компрессора (Вт):

$$L_k = 1,69 G_c R T \ln(p_2/p_1). \quad (4.10)$$

Мощность на валу аммиачного компрессора (кВт):

$$L_a = \frac{q_a G}{q_a^{\text{теор}} \eta_a}, \quad (4.11)$$

где q_a - количество теплоты, передаваемое в аммиачном теплообменнике, кДж/кг; G - часовой расход перерабатываемого воздуха, кг/ч; $q_a^{\text{теор}} = 8540$ кДж/(кВт·ч) - теоретическая

удельная холодопроизводительность аммиачной холодильной машины при температуре испарения аммиака - 40⁰С; $\eta_a = 0,66$ - общепринятый к.п.д. аммиачного компрессора.

Таким образом, суммарный расход энергии на сжижение 1 кг газа составит:

$$L_p = L_k + L_a. \quad (4.12)$$

4.4. Регенеративный цикл с изоэнтروпийным расширением (цикл среднего давления Клода)

Эффективным является цикл, основанный на изоэнтропийном расширении предварительно сжатого газа. Примером такого холодильного цикла является цикл среднего давления Клода (рисунок 4.4).

Исходный газ сжимается компрессором (линия 1-2), охлаждается (2-3) в предварительном теплообменнике и делится на части M и $(1-M)$. Часть $(1-M)$ охлаждается в теплообменнике $г$ обратным газом из детандера по изобаре 3-5, затем охлаждается в теплообменнике $д$ по изобаре 5-6, дросселируется (6-7), в результате чего образуется жидкость и пар. Пар направляется в теплообменник $д$ и отдает холод исходному газу (8-4).

Часть газа M расширяется в детандере по политропе 3-4 с отдачей работы. В результате расширения температура газа снижается, охлажденный газ присоединяется к обратному газу. Общий поток газа направляется в теплообменники $г$ и $в$, где и отдает свой холод исходному газу (4-1).

Холодопроизводительность в циклах с изоэнтропийным расширением больше, чем в циклах с изоэнтальпийным расширением на величину, эквивалентную работе, воспроизводимую детандером, т.е. на $M(i_3 - i_4)$.

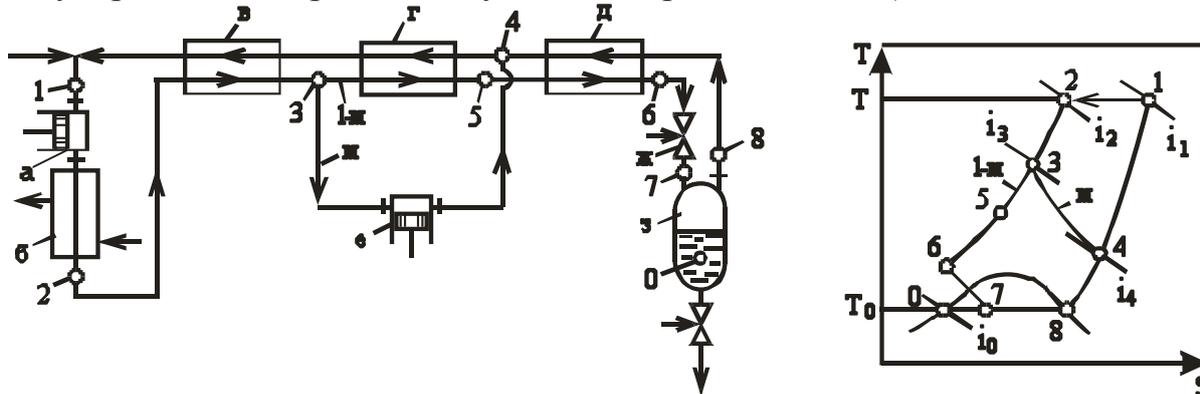


Рисунок 4.4 - Схема установки и цикл среднего давления Клода:

a - компрессор; $б$ - холодильник компрессора, обеспечивающий изотермическое сжатие; $в$ - предварительный теплообменник; $г, д$ - теплообменники; $е$ - детандер; $ж$ - дроссельный вентиль; $з$ - сборник жидкости.

Следовательно, холодопроизводительность 1 кг газа:

$$q_0 = i_1 - i_2 + M(i_3 - i_4). \quad (4.13)$$

Соответственно, ожижаемая доля газа:

$$y_d = \frac{i_1 - i_2 + M(i_3 - i_4) - \Sigma q}{i_1 - i_0} \quad (4.14)$$

Расход энергии на сжижение газа при изоэнтروпийном расширении уменьшается на величину работы, совершаемой детандером:

$$L = L_k - L_d \quad (4.15)$$

Общая затрачиваемая мощность:

$$L_k = 1,69G_cRT \ln(p_2/p_1).$$

Работа, возвращаемая детандером:

$$L_d = MG_c l_d \quad (4.16)$$

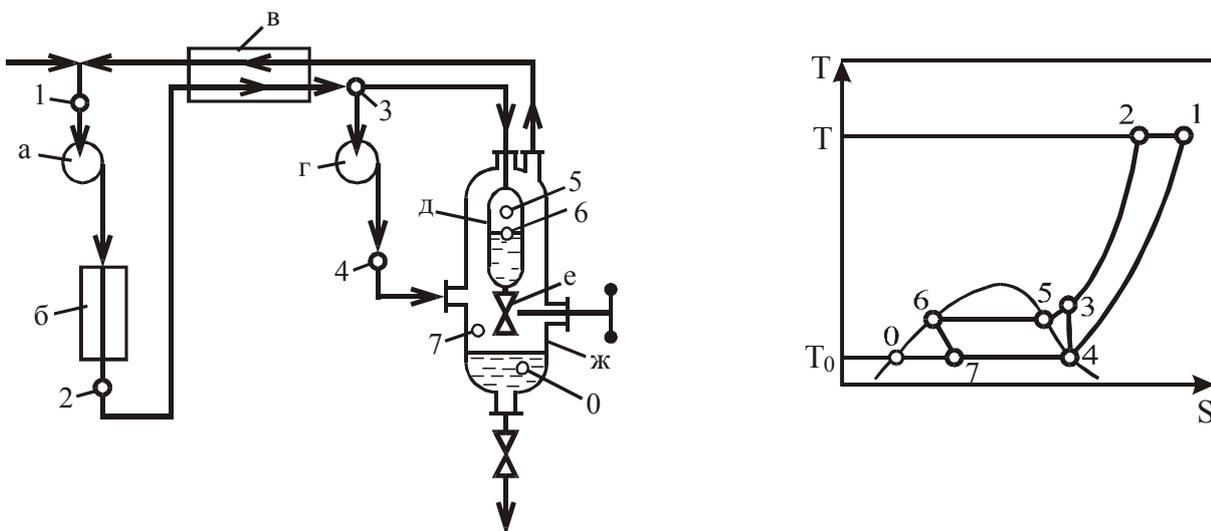
где M - доля газа, направляемая в детандер; $l_d = b(i_3 - i_5)$ - удельная работа, возвращаемая детандером, кДж/кг; b - доля от теоретического (изоэнтропийного) теплопадения в детандере.

Рассмотренный холодильный цикл Клода наиболее экономичен в том случае разделения смесей, когда разделенные компоненты должны быть получены в виде жидкостей.

Если же в результате разделения газовых смесей необходимо получить газообразные компоненты, то применяют другие холодильные циклы, основанные на изоэнтропийном расширении, например, цикл Капицы.

4.5. Регенеративный цикл с изоэнтропийным расширением и низким давлением (цикл Капицы)

Отличительной аппаратурно-технологической особенностью установки Капицы является низкое избыточное давление (для воздуха 0,5...0,6 МПа) и



применение турбинных машин: компрессора и детандера (рисунок 4.5).

Рисунок 4.5 – Схема установки и регенеративный цикл Капицы:
а - турбокомпрессор; *б* - холодильник компрессора; *в* - теплообменник; *г* - турбодетандер; *д* - охладитель; *е* - дроссельный клапан; *ж* - сборник сжиженного газа.

Исходная газовая смесь сжимается (линия 1-2) турбокомпрессором и охлаждается (2-3) в теплообменнике *в*. После охлаждения газ делится на 2 потока, один из которых направляется в ожижитель, где охлаждается и конденсируется (3-5-6). Далее следует дросселирование (6-7). Конечная жидкость (т. 0) собирается в сборнике сжиженного газа. Другая (бóльшая) часть потока охлажденного в теплообменнике газа направляется на расширение в турбодетандер (3-4). Охлажденный после турбодетандера газ направляется в качестве хладагента в ожижитель и далее в теплообменник для охлаждения сжатого газа (4-1).

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные циклы непосредственного охлаждения.
2. Чем отличается цикл с изоэнтальпийным расширением от цикла с изоэнтропийным расширением?
3. Каков принцип действия цикла Линде?
4. Каков принцип действия цикла с предварительным охлаждением газа?
5. Каков принцип действия цикла среднего давления Клода?
6. Каков принцип действия цикла Капицы?

5. ОХЛАЖДАЮЩИЕ СРЕДЫ, ИХ СВОЙСТВА И ПАРАМЕТРЫ

При холодильной обработке продукт охлаждается, отдавая теплоту охлаждающей среде.

Охлаждающей средой называется среда с более низкой, чем у продукта, температурой, при контакте с которой происходит теплообмен и снижается температура продукта. Возможно охлаждение и без непосредственного контакта со средой, когда продукт находится в упаковке.

К охлаждающим средам предъявляют ряд требований: они не должны ухудшать товарный вид продуктов, иметь запах, должны быть не токсичными, не оказывать химического воздействия на продукты и оборудование.

Охлаждающая среда с физической точки зрения может быть газообразной, жидкой, твердой и смешанной.

Для холодильной обработки и хранения продовольственных продуктов наибольшее распространение получила воздушная среда как наиболее безопасная, технологичная и экономичная.

В комбинации с воздухом в качестве газовой охлаждающей среды на практике применяют также диоксид углерода и азот.

5.1. Атмосферный воздух

Атмосферный воздух - это газовая смесь сухого воздуха и водяного пара. В состав сухой части атмосферного воздуха входят азот (78% по объему), кислород (21%), углекислый газ (0,02...0,03%), а также аргон, неон, гелий и водород. Количество водяного пара, содержащегося в 1 м³ воздуха, может колебать-

ся от долей грамма до нескольких десятков граммов и зависит от его температуры. Водяной пар в 1,6 раз легче воздуха.

Основными физическими величинами, характеризующими свойства воздуха как охлаждающей среды, являются: температура, относительная влажность, скорость движения, удельная энтальпия, парциальное давление насыщенных паров.

Температура - термодинамическая величина, характеризующая тепловое состояние тела и определяющая степень его нагретости. Температура прямо пропорциональна кинетической энергии теплового движения молекул.

Величина **относительной влажности** воздуха характеризует степень его насыщения водяным паром и измеряется как отношение количества водяного пара, содержащегося в 1 м³ воздуха, к максимальному количеству водяного пара, которое может содержаться в этом объеме при той же температуре. Относительную влажность выражают в процентах или в относительных единицах.

Большинство продуктов животного и растительного происхождения содержит значительное количество воды, причем до 90% ее находится в свободном виде в межклеточных пространствах и в составе ткани в виде мельчайших капель. Такая вода легко удаляется из продукта и так же легко поглощается им, поэтому в камерах холодильной обработки и хранения продуктов воздух имеет высокую относительную влажность. Относительная влажность в камерах устанавливается в зависимости от соотношения влагопритоков от продуктов, через ограждения, дверные проемы и влагоотвода (конденсации) на охлаждающих приборах.

С повышением температуры воздуха увеличивается его влагоудерживающая способность. Поскольку вне камеры температуры обычно выше, то содержание влаги и парциальное давление водяного пара также более высокие. Под действием разности парциальных давлений поток влаги через ограждающие конструкции направлен внутрь камер, а холодный воздух, содержащий меньшее количество водяного пара, - наружу. Соотношение количества влаги, поступившей в камеры вместе с теплым воздухом и ушедшей с холодным, определяет величину влагопритока.

При естественных условиях **парциальное давление водяного пара** над поверхностью продуктов, как правило, выше, чем в воздухе холодильной камеры, что вызывает перенос влаги от продукта к воздуху и потери массы продукта (усушку). Перенос влаги вследствие испарения зависит и от скорости движения воздуха. При контакте с приборами охлаждения воздух, насыщенный водяными парами, отдает часть влаги, которая оседает на них в виде капель или инея. Процесс этот носит постоянный характер. Соотношение между количеством влаги, поступившей к воздуху в камере, и количеством влаги, отданной воздухом теплоотводящим охлаждающим поверхностям, определяет установившееся значение относительной влажности воздуха в камере.

Масса испарившейся влаги может быть определена по разности парциальных давлений у поверхности продукта и в окружающей среде по уравнению:

$$G = \beta(p - p' \cdot \varphi)F\tau, \quad (5.1)$$

где G - масса испарившейся влаги, кг; β - коэффициент испарения, кг/(м²·Па·с); p - парциальное давление насыщенного пара у поверхности продукта, Па; p' - парциальное давление насыщенного пара в окружающей среде, Па; φ - относительная влажность воздуха в холодильной камере; F - площадь испаряющей поверхности, м²; τ - продолжительность процесса испарения, с.

В камерах длительного хранения продуктов поддерживают оптимальное значение относительной влажности путем автоматического регулирования количества водяного пара, подаваемого в камеру.

5.2. Газообразный диоксид углерода

Газообразный диоксид углерода может применяться при всех методах холодильной обработки, а также в сочетании с другими методами консервирования.

При атмосферном давлении диоксид углерода тяжелее воздуха. Он имеет меньшую удельную теплоемкость (соответственно 837 и 1000,6 Дж/(кг·К)) и коэффициент теплопроводности (0,0137 и 0,0242 Вт/(кг·К)). Плотность сухого льда 1400...1500 кг/м³, а объемная холодопроизводительность - в три раза выше, чем водного льда. При помощи диоксида углерода можно получить широкий диапазон температур, а в смеси с эфиром - до -100⁰С.

На диаграмме равновесия фаз диоксида углерода видны три линии, выходящие из одной точки, называемой тройной. Параметры этой точки $p = 5,18 \cdot 10^5$ Па, $t = -56,6^0$ С. В тройной точке вещество находится сразу в трех состояниях. При давлении ниже $5,18 \cdot 10^5$ Па диоксид углерода может находиться только в твердом и газообразном состояниях. Это означает, что если к твердому диоксиду углерода подвести теплоту при давлении, меньше указанного, то он перейдет в газообразное состояние, минуя жидкую фазу (сублимируя). При дросселировании диоксида углерода с давления 2...3 МПа до атмосферного можно получить струю газообразной и мелкодисперсной (в виде снега) смеси с температурой -79⁰С. При разбрызгивании ее в камере и на продукты дополнительно создается сильная циркуляция и за счет испарительного эффекта отводится теплота, что способствует ускорению охлаждения. Диоксид углерода тормозит развитие микроорганизмов, что способствует созданию консервирующего эффекта при последующем хранении продуктов. Степень его воздействия зависит от концентрации, температуры среды и вида микроорганизмов.

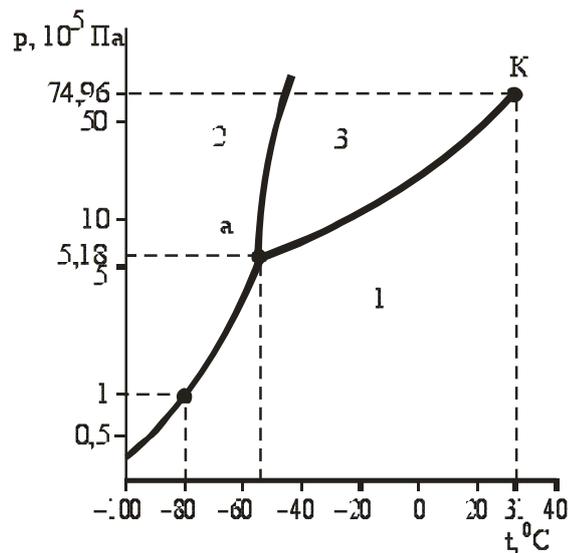


Рисунок 5.1 – Диаграмма равновесия фаз диоксида углерода:
 1 - газообразная фаза; 2 - твердая фаза; 3 - жидкая фаза; а - тройная точка,
 К - критическая точка.

Холодильное хранение продуктов в сочетании с диоксидом углерода задерживает развитие плесневых грибов, бактерий, а эффективность процесса хранения определяется температурой хранения. Консервирующее действие диоксида углерода усиливает поваренная соль. Кроме того, он обладает хорошей растворимостью в жирах и продуктах с высоким содержанием жира, где находится в свободном состоянии. При перемещении продукта в обычную среду диоксид углерода легко выделяется. Растворяясь в жире, диоксид углерода вытесняет из него кислород, что способствует замедлению окисления жира при длительном хранении.

Перспективно применение диоксида углерода для замораживания мяса в полутушах, охлаждения и замораживания мяса после обвалки в парном виде, охлаждения и замораживании мяса птицы, замораживания полуфабрикатов и формования фаршевых изделий, упаковки продуктов в среде углекислоты, охлаждения транспортных средств, реализации мороженого и т.д.

5.3. Газообразный азот

Газообразный азот для охлаждения и замораживания продуктов получают из жидкого, который хранится в специальных резервуарах при давлении несколько выше атмосферного. Жидкий азот имеет температуру кипения $-195,8^\circ\text{C}$ и в газообразном виде позволяет понижать температуру в охлаждаемом объеме очень быстро и в широком диапазоне. Поскольку воздух на 78% состоит из азота, физические свойства этих газов различаются мало. Так, азот имеет несколько меньшую плотность и коэффициент теплопроводности, а теплоемкость его выше. Теплота фазового превращения примерно в три раза ниже, чем у диоксида углерода. При охлаждении продуктов средний расход газообразного азота составляет 1...1,2 кг на 1 кг продукта, а с учетом сравнительно высокой стоимости его применяют для хранения особо ценных продовольственных товаров

(либо при отсутствии энергии). В то же время его применение достаточно эффективно при предварительном охлаждении плодов и транспортировании безмашинным холодильным транспортом. При охлаждении, транспортировании и хранении продуктов принимают меры для предотвращения подмораживания. С этой целью газ низкой температуры в специальном резервуаре перемешивают с газом из охлаждаемого помещения, понижая его температуру до необходимой. При использовании газообразного азота, так же, как и диоксида углерода, резко снижается содержание кислорода, что тормозит развитие микроорганизмов и окислительные процессы.

5.4. Жидкие охлаждающие среды

В качестве жидких охлаждающих сред для охлаждения продуктов используют холодную воду и слабые солевые растворы, а для замораживания - водные растворы солей высокой концентрации, гликоли, жидкие азот, диоксид углерода, воздух, хладоны и т.д.

Жидкие среды обладают большей теплопроводностью и теплоемкостью, чем газообразные, и поэтому при применении их существенно сокращается продолжительность холодильной обработки продуктов.

Для охлаждения продуктов до температуры, близкой к 0°C , в качестве охлаждающей среды применяют чистую, безупречную с санитарной точки зрения ледяную воду. Охлаждают продукты методами погружения или орошения. Эти способы достаточно эффективны для охлаждения птицы, рыбы, плодов.

Более низкие температуры можно получить при использовании морской воды и слабых растворов хлористого натрия, магния, кальция. Температура замерзания морской воды в зависимости от содержания в ней солей колеблется от $-1,5$ до -3°C . Лучшие результаты дает добавление льда в холодную воду.

Продолжительность охлаждения в холодной воде зависит от вида и размеров продукта, температуры воды, скорости ее циркуляции и составляет от нескольких минут до нескольких часов.

Для замораживания продуктов применяют **водные растворы солей высокой концентрации**. При повышении концентрации соли температура замерзания растворов понижается. Самая низкая температура замерзания растворов - это криогидратная, соответствующая эвтектической концентрации соли. Такое состояние является следствием термодинамического равновесия трех фаз - раствора, соли и льда. С дальнейшим повышением содержания соли в смеси температура ее плавления не понижается, а повышается. На практике применяют водные растворы солей хлористого натрия, магния и кальция, которые при эвтектической концентрации солей имеют минимальную температуру замерзания - соответственно $-21,2$, $-33,6$, -55°C . Ограниченно используют также растворы сульфата натрия, цинка и хлорида калия, криогидратная температура которых составляет соответственно $-1,2$, $-6,5$ и $-11,1^{\circ}\text{C}$.

Хлорид натрия - дешев, обладает высокой теплопроводностью, но имеет большую коррозионную способность. При замораживании неупакованных продуктов частично их просаливает. **Хлорид кальция** - весьма токсичен. Все это

ограничивает применение этих солей. Как правило, их используют в закрытых системах охлаждения, которые меньше подвержены коррозии благодаря более низкому содержанию кислорода и применению специальных добавок – пассиваторов (силикат натрия, хромовая смесь и др.), уменьшающих коррозию. Наибольшее применение они находят в безмашинных способах охлаждения холодоаккумуляторами с эвтектическим раствором (эвтектические плиты) на холодильном транспорте, а также при рассольном охлаждении в старых системах охлаждения больших холодильников.

Гликоли – это жидкости, водные растворы которых имеют низкую температуру замерзания. Гликоли менее агрессивны к металлам, но более вязки и менее теплопроводны. Этиленгликоль слабоядовит, без запаха, смешивается с водой в любых соотношениях, температура замерзания чистого этиленгликоля $-17,5^{\circ}\text{C}$, а его 70%-го раствора в воде $-67,2^{\circ}\text{C}$. Пропиленгликоль в водных растворах не взаимодействует с металлами, не токсичен. Эти хладоносители очень эффективны для быстрого замораживания продуктов небольшой массы в упакованном виде.

Для замораживания продуктов до -40°C можно использовать также дихлорметан, представляющий собой бесцветную жидкость, почти нерастворимую в воде, с температурой замерзания -60°C . К его недостаткам относятся небольшая теплоемкость и горючесть.

Жидкий азот применяют для замораживания особо ценных продуктов орошением или погружением, а также для получения газообразного азота и его использования в смеси с воздухом. Температура кипения жидкого азота $-195,6^{\circ}\text{C}$, поэтому между замораживаемым продуктом и охлаждающей средой создается большой температурный перепад, что значительно интенсифицирует процесс.

Аналогично используют жидкий диоксид углерода, жидкий воздух, жидкие хладоны.

5.5. Твердые охлаждающие среды

К твердым охлаждающим средам относят водный лед, смесь льда и соли, сухой лед.

Естественный и искусственный лед, полученный из пресной и морской воды, используют для охлаждения, хранения и транспортирования продуктов питания. Широкое применение льда в качестве охлаждающей среды объясняется, прежде всего, его физическими свойствами, а также экономическими факторами.

Температура плавления водного льда при атмосферном давлении 0°C , удельная теплота плавления – 335 кДж/кг , плотность – 917 кг/м^3 , удельная теплоемкость – $2,1 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$, теплопроводность – $2,3 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$. Переход воды в лед сопровождается увеличением объема на 9%.

Естественный лед заготавливают путем вырезания или выпиливания крупных блоков из естественных водоемов, послойного намораживания воды на горизонтальных площадках, наращивания сталактитов в градирнях. (Особым

спросом для пищевых целей пользуется гренландский и антарктический лед как наиболее чистый. Возраст гренландского льда более 100000 лет). Лед хранят на площадках в буртах, укрытых насыпной изоляцией, и в льдохранилищах с постоянной и временной теплоизоляцией.

Искусственный лед получают путем замораживания чистой пресной или морской воды в льдогенераторах. Качество льда, его форма, размер и способ получения, хранения и доставки потребителю обусловлены назначением и спецификой применения.

Матовый лед изготавливают из питьевой воды без какой-либо ее обработки в процессе замораживания. В отличие от естественного он имеет молочный цвет, обусловленный наличием большого количества пузырьков воздуха, которые образуются в процессе превращения воды в лед. Пузырьки воздуха уменьшают проницаемость льда для световых лучей, и он становится непрозрачным.

Прозрачный лед по виду напоминает стекло. Для его получения в форму наливают воду и при помощи форсунок продувают сжатый воздух. Проходя через замораживаемую воду, он захватывает и увлекает за собой пузырьки воздуха. Прозрачный лед изготавливают в виде кусков небольших размеров и используют для охлаждения напитков.

Лед с бактерицидными добавками предназначен для охлаждения рыбы, мяса, птицы и некоторых видов овощей путем непосредственного соприкосновения с ними. Бактерицидные добавки снижают обсемененность продуктов микроорганизмами.

В зависимости от формы и массы искусственный лед бывает блочный (5...250 кг), чешуйчатый, прессованный, трубчатый и снежный.

Блочный лед дробят на крупный, средний и мелкий.

Чешуйчатый лед получают путем напыления воды на вращающийся барабан, плиту или цилиндр, являющимися испарителями хладагента. Вода на поверхности барабана быстро замерзает, а образовавшийся лед при вращении барабана срезается фрезами или ножом. Льдогенераторы производят от 60 до 5000 кг/сут такого льда. Чешуйчатый лед эффективен при охлаждении рыбы, мясных изделий, зеленых овощей, некоторых плодов. Наибольший коэффициент теплоотдачи достигается, когда при охлаждении продукты плотно соприкасаются со льдом.

При смешении дробленного водного льда с различными солями, помимо теплоты таяния льда, поглощается теплота растворения соли в воде, что позволяет существенно понизить температуру смеси. Раствор может быть охлажден до криогидратной точки.

Льдосоляное охлаждение осуществляют как контактным, так и бесконтактным способом.

Недостатком контактного льдосоляного охлаждения является просаливание продукта, которое при длительном хранении стимулирует окисление жира, вызывает снижение товарного вида и потребительских достоинств. Бесконтактное льдосоляное охлаждение в виде полых плит с эвтектическими растворами позволяет избежать этих недостатков.

Сухой лед - это твердый диоксид углерода. Производство сухого льда состоит из трех последовательных стадий:

- 1) получение чистого газообразного диоксида углерода;
- 2) сжижение его до образования снегообразной массы;
- 3) прессование этой массы блоками плотностью 1400...1500 кг/м³.

В зависимости от давления, при котором получают сухой лед, различают его производство: по циклу высокого, среднего и низкого давления.

Сухой лед из жидкого диоксида углерода также получают двумя способами:

- 1) дросселированием жидкого диоксида углерода по давлению тройной точки с последующим прессованием рыхлого влажного снега в блоки сухого льда;
- 2) дросселированием до атмосферного давления с уплотнением блока льда в процессе льдообразования.

Как охлаждающая среда, он имеет значительные преимущества перед водным льдом: холодопроизводительность на единицу массы в 1,9 раз, а на единицу объема - в 2,9 раза больше; при атмосферном давлении сухой лед переходит в газообразное состояние, минуя жидкую фазу, что исключает увлажнение поверхности продукта. Благодаря низкой температуре сублимации сухого льда (-78,9⁰С) и выделению газообразного диоксида углерода понижается концентрация кислорода у поверхности продукта, и создаются неблагоприятные условия для жизнедеятельности микроорганизмов.

Сухой лед укладывают поверх и между упаковок продуктов и используют как охлаждающую среду для хранения мороженого, фруктов, ягод. Сухой дробленый лед используют в специальных системах охлаждения, для чего его помещают в специальные металлические емкости. Продукты сублимации льда отводят в грузовой объем помещения или наружу.

Прямым эжектированием жидкого диоксида углерода получают **твердый гранулированный**, или **снегообразный, диоксид углерода**, который используют для охлаждения упакованных продуктов (мясных, рыбных, овощных).

В многоплиточных и конвейерных морозильных аппаратах в качестве теплопередающей среды используют различные металлы в виде полых плит, внутри которых циркулирует промежуточный хладоноситель. Металлы имеют высокую тепло- и температуропроводность и, непосредственно соприкасаясь с продуктом, интенсифицируют теплообмен. Наиболее широко применяют сталь, чугун, медь, алюминий и алюминиевые сплавы.

В качестве охлаждающей взвешенной в воздухе промежуточной теплопередающей среды при флюидизационном способе замораживания применяют мелкодробленый лед, полимерные шарики, а также композиции (например, смесь, состоящую из манной крупы, сахара, соли и мелкодробленого льда). Такая среда под воздействием направленного вверх с небольшой скоростью воздушного потока, создаваемого вентиляторами, превращается в кипящий слой, через который движется замораживаемый продукт. Таким способом замораживают ягоды, овощи, полуфабрикаты.

Контрольные вопросы

1. Что называется охлаждающей средой?
2. Какие требования предъявляются к охлаждающим средам?
3. Какие физические величины характеризуют свойства газообразной охлаждающей среды?
4. В чем особенности газообразного диоксида углерода как охлаждающей среды?
5. В чем особенности газообразного азота как охлаждающей среды?
6. Какие используются жидкие охлаждающие среды?
7. Какие используются твердые охлаждающие среды?
8. Как получают сухой лед?
9. Назовите виды искусственного льда.

6. Холодильная технология

6.1. Общие сведения

Сохранение продовольственных продуктов основано на способности микроорганизмов реагировать на воздействие факторов физической, химической и биологической природы. Изменяя условия среды и оказывая то или иное воздействие на продукт, можно регулировать состав и активность его микрофлоры.

Способ консервирования холодом основан на том, что при понижении температуры значительно снижается жизнедеятельность микроорганизмов и активность тканевых ферментов, вызывающие замедление реакций как естественно протекающих в продуктах (дыхание и созревание плодов и др.), так и вызываемых деятельностью микроорганизмов.

Холодильная технология – это отрасль знаний и практической деятельности, решающая задачи сохранения продовольственных продуктов с помощью холода, а также использования холода при их промышленном производстве.

Холодильная технология как наука изучает влияние холодильной обработки и хранения на продовольственные продукты и определяет оптимальные условия проведения технологических процессов (охлаждение, замораживание, хранение и др.) с учетом особенностей продуктов и свойственных им изменений;

разрабатывает научно обоснованные методы снижения потерь массы продуктов при их холодильной обработке и хранении;

совершенствует и создает новые технологии холодильной обработки и хранения совместно с другими видами консервирования, позволяющими минимизировать изменения свойств и потери массы продуктов.

6.2. Принципы сохранения пищевых продуктов

Известно, что некоторые пищевые продукты, например, мука, крупы, сахар и т.п., не портятся при хранении длительное время в обычных условиях.

Для кратковременного и особенно длительного хранения других продуктов требуются специальные условия, так как качество их относительно быстро ухудшается – изменяются присущие свежим продуктам вкус, цвет, запах, консистенция. Такие пищевые продукты называют скоропортящимися. К ним относятся мясо и мясопродукты; рыба и морепродукты; молоко и молочные продукты; яйца и яичные продукты; масло животное и растительные жиры; свежие плоды и овощи; дрожжи хлебопекарные; фруктовые соки и минеральные воды; пиво; виноградные и плодово-ягодные вина; сиропы; мороженое и многие другие.

Эти продукты являются скоропортящимися, поскольку содержание в них значительного количества воды, а также органических соединений создает благоприятные условия для развития и жизнедеятельности различных микроорганизмов и ферментов.

Совокупность свойств, от которых зависит степень использования пищевых продуктов по назначению, определяет их качество. Важно, чтобы пищевые продукты были свежими, питательными и вкусными.

Все скоропортящиеся продукты во время хранения подвергаются значительным изменениям. Если по отношению к ним не применить своевременно те или иные способы консервирования, то они относительно быстро придут в негодность. Следовательно, консервирование пищевых продуктов заключается в специальной их обработке для предохранения от порчи при хранении.

Продукты могут портиться под влиянием различных факторов:

- 1) под действием кислорода воздуха и солнечных лучей;
- 2) вследствие чрезмерно низкой или очень высокой влажности воздуха;
- 3) вследствие биохимических процессов (деятельность тканевых ферментов);
- 4) под влиянием микробиологического фактора.

Все методы консервирования подразделяют на физические, физико-химические, химические, биохимические и комбинированные.

В основы **физических методов** положено использование высоких и низких температур, а также ионизирующих излучений, ультрафиолетовых лучей, ультразвука и фильтрации.

Физико-химические методы включают сушку, соление и использование сахара.

Химические методы консервирования основаны на применении химических веществ, которые должны быть безвредными для человека и не должны изменять вкус, цвет и запах продукта.

В настоящее время в России в качестве консервантов разрешены следующие химические препараты: этиловый спирт, уксусная, сернистая, бензойная, сорбиновая кислоты и некоторые их соли, борная кислота, уротропин, отдельные антибиотики, озон, углекислый газ и ряд других.

Биохимические методы консервирования основаны на подавляющем действии молочной кислоты, образующейся в результате сбраживания сахаров продукта молочнокислыми бактериями.

К **комбинированным методам** консервирования относят дымное и бездымное копчение, а также некоторые другие способы, основанные на использовании нескольких видов консервантов одновременно.

Микроорганизмы и ферменты вызывают разложение белков, гидролиз жиров, глубокие превращения углеводов и другие изменения. Поэтому основная задача консервирования пищевых продуктов сводится к ограничению или устранению разрушительного действия микроорганизмов и тканевых ферментов. Применяемые методы сохранения пищевых продуктов, в основу которых положено внешнее воздействие на биологические факторы порчи, классифицируются следующим образом.

Биоз – поддержание жизненных процессов в продуктах с использованием для этой цели иммунитета. Этот принцип применяют при хранении плодов и овощей, транспортировании и реализации живой рыбы, предубойном содержании скота, птицы.

Анабиоз – замедление, подавление жизнедеятельности микроорганизмов и активности тканевых ферментов при помощи таких способов консервирования, как холодильная обработка и хранение, сушение и вяление, маринование, консервирование в сахарном сиропе и т.д.

Ценоанабиоз – подавление вредной микрофлоры за счет создания условий для жизнедеятельности полезной микрофлоры, способствующей сохранению продуктов (квашение, молочнокислое и спиртовое брожение при производстве и хранении кисломолочных продуктов).

Абиоз – прекращение жизнедеятельности микроорганизмов в продуктах (высокотемпературная обработка, применение лучистой энергии, токов высокой и сверхвысокой частоты, антибиотиков, антисептиков и др.).

С биологической точки зрения все методы консервирования отличаются друг от друга тем, что при применении их достигается различная степень торможения нежелательных процессов в продуктах. При выборе метода консервирования, кроме основной цели (торможение нежелательных процессов), стремятся добиться максимальной сохранности продукта, а также экономичности процесса. Поэтому в практической деятельности часто разные способы консервирования комбинируют.

Лучшим способом консервирования является тот, который позволяет возможно более длительное время хранить продукт с наименьшими потерями пищевой ценности и массы. Этим требованиям в наибольшей степени отвечает применение искусственного холода. С точки зрения экономичности холод превосходит методы тепловой обработки по затратам энергии (таблица 6.1):

Таблица 1 - Расход энергии при различных способах консервирования

Способ консервирования	Расход энергии, кВт·ч
Охлаждение	15
Замораживание	100
Пастеризация	130
Стерилизация	235
Сушка	660

В зависимости от решаемых задач продукты подвергаются разной глубине холодильной обработки (охлаждение, переохлаждение или подмораживание, замораживание, домораживание), а для восстановления натуральных свойств к продукту подводится теплота (отепление, размораживание).

Охлаждение – процесс отвода теплоты от продуктов с понижением их температуры не ниже криоскопической (*криоскопическая температура - это температуры начала замерзания жидкой фазы продуктов*).

На практике все более широко применяют предварительное охлаждение, предшествующее любому последующему этапу технологического цикла обработки холодом и существенно снижающее потери при последующем хранении.

Подмораживание (переохлаждение) – процесс с понижением температуры продукта ниже криоскопической, сопровождающийся частичной кристаллизацией влаги в поверхностном слое. Продолжительность хранения продуктов в подмороженном состоянии увеличивается в 2...2,5 раза по сравнению с охлажденными.

Замораживание – отвод теплоты от продуктов с понижением температуры ниже криоскопической при кристаллизации большей части воды, содержащейся в продукте. Это предопределяет стойкость продуктов при длительном холодильном хранении.

Домораживание – понижение температуры до заданного уровня при отводе теплоты от частично замороженного продукта.

Отепление – подвод теплоты к охлажденным продуктам с повышением их температуры до температуры окружающей среды или несколько ниже.

Размораживание – подвод теплоты к продуктам с целью декристаллизации содержащегося в них льда. В конце процесса температура продукта достигает 0⁰C и выше, кристаллы льда плавятся, и ткани поглощают влагу. Целью процесса размораживания является максимальное поглощение тканями влаги и полное восстановление первоначальных свойств продуктов.

Продолжительность холодильной обработки исчисляется минутами, часами, иногда сутками, и влияет на качество и сохранность продуктов при последующем холодильном хранении.

Холодильное хранение – это хранение продуктов после холодильной обработки при заданном режиме в камере.

Под **режимом холодильной обработки и хранения** продуктов понимают совокупность параметров и условий, влияющих на их качество (температура, относительная влажность, скорость движения воздуха, состав среды, укладка, продолжительность процесса).

Особое значение при холодильном хранении, особенно длительном, имеет сокращение потерь массы продуктов, что достигается строгим соблюдением режима и применением дополнительных методов.

Наиболее эффективное использование холодильного консервирования требует соблюдения единой непрерывной холодильной цепи на протяжении всего пути продукта от производства до потребителя.

6.3. Влияние низких температур на рост и размножение микроорганизмов

Различают три группы микроорганизмов по их отношению к температурным условиям: термофилы, мезофиллы и психрофилы.

Термофилы – микроорганизмы, развивающиеся при температурах 20...80⁰С, оптимально при 50...75⁰С.

Мезофиллы живут при температурах 5...57⁰С.

Психрофилы способны расти при относительно низких температурах – от 10 до -10⁰С. Нас интересуют именно психрофилы, развивающиеся в условиях холодильного хранения пищевых продуктов. Различают **факультативные** психрофилы, условия жизни которых приближаются к режиму мезофиллов, и **облигатные**, т.е. строгие психрофилы, способные размножаться только при низких температурах.

Психрофильные бактерии активно размножаются на продуктах с небольшой кислотностью – на мясе, рыбе, не кислых молочных и овощных продуктах при температуре -5...-8⁰С.

Большинство плесеней является психрофильными, они довольно активно развиваются на замороженных продуктах. Отдельные виды плесеней прекращают размножение лишь при -8...-10⁰С. Они так же, как и дрожжи, размножаются главным образом на кислых продуктах. Являясь аэробами, плесени растут вплоть до температуры -2...-3⁰С, при более низкой температуре их размножение прекращается.

Устойчивость микроорганизмов к действию отрицательных температур зависит от трех факторов: температуры, скорости ее понижения и времени воздействия.

Действие отрицательных температур на микроорганизмы проявляется в изменении состояния воды в микробной клетке. Максимальное повреждающее действие оказывает внутриклеточное образование льда. Это приводит к повышению концентрации внутри- и внеклеточных растворов, что ведет к денатурации белков и нарушению барьеров проницаемости.

Однако повреждение микроорганизмов холодом может происходить и без образования льда. Гибель бактериальных клеток в результате холодового шока происходит при очень быстром охлаждении из-за низкого осмотического давления. При этом губительное действие низких температур связано с нарушением нуклеиновых кислот и целостности липидных мембран.

Устойчивость микроорганизмов к отрицательным температурам зависит и от продолжительности воздействия холода. В начале замораживания число бактериальных клеток быстро уменьшается, затем гибель микроорганизмов замедляется и, наконец, остаются устойчивые к низким температурам клетки, количество которых зависит от условий замораживания, индивидуальной устойчивости вида микробов.

Необходимо иметь в виду, что развитие микроорганизмов при температуре выше -10⁰С возможно и это может привести к снижению качества хранящегося продукта и даже к его порче. Так, при длительном хранении мороженого

мяса при температуре выше -8°C могут развиваться плесневые грибы. Они появляются отдельными колониями, которые впоследствии увеличиваются и уплотняются. Мицелий гриба проникает в толщу мяса, и начинается спороношение. На поверхности продукта появляются белые, серые или черные пятна, в толще мяса накапливаются продукты жизнедеятельности плесеней, появляется затхлый запах. Аналогично протекают эти процессы при хранении мороженой рыбы и других продуктов.

В замороженных ягодах или фруктово-ягодных соках, хранящихся при температуре выше -8°C , образуется продукт жизнедеятельности дрожжей – спирт.

6.4. Воздействие низких температур на клетки, ткани и организмы

Как правило, действие низких температур на клетки, ткани и организмы носит в большей или меньшей степени повреждающий характер.

Это происходит, во-первых, вследствие глубокого нарушения обмена веществ при быстром понижении температуры, получившего название «температурный шок». Такое явление объясняется нарушением динамического равновесия биохимических процессов вследствие того, что активность разных ферментов при резком снижении температуры различна. В результате в клетках накапливаются промежуточные, зачастую токсичные, продукты обмена веществ (метаболиты). Если процесс охлаждения проводится быстро, то может наступить гибель биологического объекта. При постепенном снижении температуры организм может адаптироваться, т.е. приспособиться к изменяющимся условиям, и в этом случае выжить. Очень часто температурный шок сопровождается структурными изменениями в клетках. Внезапное охлаждение может привести к значительному увеличению вязкости протоплазмы – до гелеобразования с последующим отделением жидкой фазы.

При охлаждении биологических объектов ниже температур, при которых происходит превращение воды в лед, основную роль начинают играть повреждающие факторы процессов кристаллообразования.

Процесс льдообразования при постепенном понижении температуры начинается после более или менее глубокого переохлаждения. Сначала кристаллы льда образуются в межклеточной жидкости, концентрация растворенных веществ которой вследствие вымерзания воды начинает увеличиваться. Возникает разность между концентрациями растворов в межклеточном пространстве и внутри клеток, что приводит к перемещению влаги из клеток к кристаллам в межклеточном пространстве. Таким образом, увеличиваются кристаллы снаружи клеток, и обезвоживается их содержимое. В дальнейшем процесс кристаллизации может начаться и в самих клетках. При оттаивании рассмотренные явления развиваются в обратной последовательности.

В случае быстрого понижения температуры биологических объектов кристаллизация может происходить одновременно внутри клеток и в окружающей их межклеточной жидкости.

В процессе хранения наблюдается миграционная перекристаллизация – увеличение размеров крупных кристаллов вследствие исчезновения мелких.

Одной из причин повреждения клеток является механическое действие на них кристаллов льда, которое приводит к разрыву клеток, проколам и порезам. Кроме того, из-за разрастания кристаллов льда в межклеточном пространстве уменьшаются размеры клетки, что вызывает сжатие и образование складок в оболочке, в результате чего может произойти механическое повреждение протоплазмы. При поступлении воды в клетку во время размораживания тесно соприкасающиеся слои протоплазмы начинают расходиться и при этом часто происходит отрыв протоплазмы от оболочки, что приводит к повреждению структуры клетки.

Еще более сильным повреждающим фактором является денатурация протоплазменных белков, вызванная обезвоживанием клетки в результате вымораживания воды. Так, сближение молекул белка в результате обезвоживания приводит к тому, что сульфгидрильные группы $-SH$ - отдельных белковых молекул вступают во взаимодействие и образуют дисульфидные связи. При оттаивании вода проникает в клетки и начинает раздвигать белковые молекулы. Однако вследствие того, что энергия образовавшихся дисульфидных связей выше, чем энергия водородных связей в структуре самой молекулы, происходит разрыв не дисульфидных, а водородных связей, что вызывает разворачивание молекул белка, т.е. их денатурацию.

В результате вымораживания воды обезвоживание клетки может достигнуть такой степени, что различные протоплазматические структуры приходят в соприкосновение. При этом возможен перенос ряда активных структурных компонентов с одной поверхности на другую. Например, соприкосновение сложных мембран митохондрий, на которых расположены ферменты в строго установленной последовательности, может нарушить энергетические процессы и привести к гибели клетки.

Наконец, еще одним фактором повреждающего действия является повышение концентрации минеральных солей (электролитов) в незамерзшей клеточной жидкости при обезвоживании в процессе кристаллообразования. Под действием образующихся концентрированных солевых растворов происходит денатурация белков, причем развитие ее зависит не только от концентрации солей, но и от величины рН среды. К повышению концентрации солей особенно чувствительны липопротеиды, из которых в основном состоят мембраны клеток.

Поскольку с повышением концентрации солевых растворов возрастает осмотическое давление, весь комплекс рассмотренных явлений, развивающийся при замораживании, получил название «осмотический шок».

Установлено, что многие органические вещества и некоторые биологические объекты лучше сохраняются при быстром и сверхбыстром замораживании. Например, диски концентрированного желатинового геля, быстро замороженные в жидком воздухе, не изменяются в результате кристаллообразования, а также под действием повреждающих факторов. Яичный желток утрачивает

биологическую активность после замораживания до -6°C , но не повреждается при замораживании в жидком азоте и быстром оттаивании в теплой ртути.

В ряде случаев активность ферментов сохраняется в значительной степени при быстром и сверхбыстром замораживании. При быстром охлаждении остается меньше времени для воздействия солевых растворов на структуру белков молекул живых клеток. Микроскопические исследования биологических объектов показали также, что их структура сохраняется тем лучше, чем быстрее происходит замораживание.

Сохранение жизнеспособности биологических объектов при их сверхбыстром замораживании обусловлено стеклообразованием воды в протоплазме клеток и последующим расстеклованием при быстром оттаивании. В ходе этих процессов не происходит перегруппировка молекул воды, что способствует сохранению тонкой структуры протоплазмы клеток.

Стеклообразование представляет собой глубокое переохлаждение жидкости, при котором в ней отсутствует кристаллическая решетка.

Исследования биологических объектов показали, однако, что даже при охлаждении с максимальной скоростью эти объекты всегда содержат наряду с аморфной, стеклообразной массой затвердевшей жидкости мельчайшие кристаллы льда.

Степень повреждающего действия низких температур зависит от места образования кристаллов льда в клетках и тканях биологических объектов. Так, при внутриклеточной кристаллизации интенсивно разрушаются элементы протоплазмы. При замораживании растительных организмов образование льда внутри клеток всегда приводит к их гибели. Подавляющее большинство клеток животного организма также не выдерживает внутриклеточного льдообразования.

Благодаря использованию защитных веществ (глицерин, сахарный сироп, полиэтиленоксид и др.) при замораживании возможно применение очень высоких скоростей замораживания.

6.5. Вспомогательные средства, применяемые при холодильной обработке и хранении

Для сохранения качества, снижения потерь и увеличения продолжительности хранения продуктов применяют дополнительные к холоду средства: ультрафиолетовое и ионизирующие излучения, регулируемые газовые среды (РГС), модифицированные газовые среды (МГС), повышенное и пониженное давление, пищевые покрытия, упаковку и т.д.

Ультрафиолетовое излучение. Его широко применяют на пищевых и торговых предприятиях для санации воздуха и поверхностного слоя продуктов. Оно охватывает область электромагнитных колебаний с длиной волны 13,6...400 нм, обладает большой энергией и поэтому оказывает сильное химическое, физическое и биологическое воздействие. В зависимости от длины волны действие различных участков ультрафиолетового спектра неодинаково. Наибольшим воздействием на бактерии, подавляющим их жизнедеятельность,

обладают лучи с длиной волны от 295 до 200 нм. Данная область называется бактерицидной. Максимум бактерицидного действия оказывают лучи с длиной волны около 260 нм.

Бактерицидные ламповые источники ультрафиолетовых лучей, выпускаемые промышленностью, представляют собой газоразрядные лампы низкого давления с самонакаливающимися катодами. Они работают от электрической сети переменного тока напряжением 127 и 220 В.

В условиях производства и хранения продуктов наибольшую опасность в отношении заражения их микрофлорой представляет бактериальный аэрозоль, находящийся вследствие конвекции воздуха во взвешенном состоянии.

Под воздействием УФ-лучей происходит отмирание микроорганизмов только в поверхностном слое продукта, так как проникающая способность лучей не превышает 0,1 мм. Стерилизующий эффект облучения зависит от микробиологической загрязненности продукта и стадии развития микроорганизмов. В сочетании с низкими положительными температурами оно значительно увеличивает сроки хранения (в два раза и более) охлажденного мяса, яиц, полукопченых и копченых колбас, сыров, цитрусовых и других продуктов.

Под влиянием облучения рост микрофлоры резко замедляется, т.е. проявляется бактериостатический эффект, который зависит не только от дозы облучения, но и от состояния внешней среды. С понижением температуры среды продолжительность бактериостатического эффекта увеличивается.

Ионизирующие излучения. Вследствие их высокой энергии они способны вызвать ионизацию электрически нейтральных атомов и молекул и стимулировать в облученных материалах однотипные химические реакции.

Обработку продуктов проводят в специальных аппаратах (например, кобальтовые пушки), где происходит радиоактивный распад различных изотопов. При этом в продуктах возникают химические превращения, связанные в первую очередь с ионизацией воды, что вызывает образование свободных радикалов с высокой химической активностью, которые приводят к изменениям в клетках. При определенной дозировке лучи подавляют жизнедеятельность микроорганизмов. На практике радиационную обработку проводят в виде **радианпертизации** – до полной стерильности продукта; **радуризации** – до ограниченного подавления микрофлоры; **радисидации** – выборочного подавления микроорганизмов какого-либо типа с целью увеличения продолжительности хранения продукта.

Применение антисептиков. Оно основано на их свойстве подавлять микроорганизмы, предохраняя тем самым продукты от порчи. Проникая в клетку микроорганизма, эти вещества вступают во взаимодействие с белками протоплазмы, что приводит к ее гибели.

К антисептикам предъявляют ряд требований, важнейшими из которых являются их безвредность и минимальные изменения потребительских свойств продуктов.

В качестве антисептиков применяют кислоты — сорбиновую и бензойную, перекись водорода, диоксид серы и др.

Регулируемая газовая среда (РГС) как метод консервирования заключается в хранении плодов и овощей в атмосфере с пониженной концентрацией кислорода и более высокой, чем в воздухе, концентрацией диоксида углерода. Снижение концентрации кислорода и повышение углекислого газа замедляют процесс газовой выделения в два-три раза и уменьшают теплоту дыхания до 3-5%.

Благодаря использованию РГС для хранения плодов и овощей в охлажденном состоянии увеличиваются сроки созревания и хранения и уменьшаются потери. В практике хранения применяют газовые среды разных типов, различающиеся содержанием кислорода и углекислого газа.

Состав газовой смеси зависит от вида сырья, сорта, условий выращивания и других факторов.

Модифицированная газовая среда. Она является разновидностью РГС, в этом случае газовый состав при хранении плодов и овощей создается в упаковке продукта и выдерживается с меньшей точностью.

Для поддержания стабильности газовой среды внутри упаковки при хранении плодов используют селективно-проницаемые мембраны из пленок с высокой газопроницаемостью, поглотители углекислого газа и паров воды, перфорированные пленочные материалы. Часто эти способы комбинируют, применяя дополнительную обработку плодов, поглотители этилена, альдегидов и других веществ, выделяемых плодами при хранении и влияющих на их качество.

Селективно-проницаемые мембраны изготавливают обычно из силиконового каучука - пленочного материала с хорошей газопроницаемостью. В таких упаковках создается модифицированная микроатмосфера, которую в определенной степени можно регулировать, подбирая пленки с различной селективной проницаемостью для газов; сорта и количества плодов, а также температурно-влажностный режим в хранилищах.

Хранение яблок в полиэтиленовых контейнерах с силоксановыми мембранами позволяет значительно увеличить выход товарных плодов и снизить потери, сократить их естественную убыль.

Для мелкой потребительской упаковки свежих фруктов, овощей и ягод используют различные пленочные материалы в зависимости от интенсивности дыхания объекта.

Модифицированную газовую атмосферу применяют также для консервирования сырья животного происхождения и продуктов его переработки. Повышенные концентрации углекислоты подавляют жизненные функции микроорганизмов охлажденного мяса и мясопродуктов и процессы окисления жира.

При переработке мяса в качестве консервирующего средства применяют препарат «Бомаль», в состав которого входит ацетат, цитрат и Л-аскорбат натрия, Л-аскорбиновая кислота. Препарат стабилизирует количество микроорганизмов, способствует увеличению срока хранения мясопродуктов, сохранению их свежести и улучшению органолептических свойств.

6.6. Виды холодильной обработки пищевых продуктов

Процесс охлаждения

Охлаждением пищевых продуктов широко пользуются для удлинения сроков их хранения.

Охлаждение – это понижение температуры объекта до заданной конечной температуры, но не ниже криоскопической. Благодаря охлаждению задерживаются биохимические процессы и развитие микроорганизмов. Охлажденным считается продукт, в толще которого поддерживается температура от 0 до 4⁰С.

Основная задача охлаждения заключается в создании неблагоприятных условий для развития микробных и ферментативных процессов в пищевых продуктах.

Целью охлаждения является сохранение первоначального качества продукта в течение определенного времени.

Для многих продуктов, особенно растительного происхождения, являющихся живыми организмами, выбор конечной температуры охлаждения, при которой они будут храниться, имеет большое значение.

Повышение или понижение температуры на несколько градусов по сравнению с оптимальной температурой хранения приводит к заболеваниям и преждевременной порче продуктов.

Каждый способ охлаждения оценивают по совокупности большого числа признаков, среди которых первостепенное значение имеют качество получаемого продукта и экономичность способа охлаждения.

Известные способы охлаждения пищевых продуктов можно подразделить на три основные группы:

- охлаждение в контакте с воздухом;
- в контакте с жидкостью (или тающим льдом или снегом);
- в контакте с инертными газами.

Эти способы различаются по величине коэффициентов теплоотдачи на поверхности охлаждаемого продукта.

Пищевые продукты охлаждают чаще всего в воздухе, несмотря на то, что коэффициент в воздухе самый малый.

Когда указывают режимы охлаждения в воздухе, то называют обычно его температуру, среднюю скорость движения и относительную влажность.

Поле относительной влажности воздуха в камерах охлаждения так же, как и в камерах замораживания, резко неравномерно.

Если поверхность охлаждаемого тела влажная, то воздух около нее находится в состоянии насыщения при температуре тела, а у поверхности охлаждающих приборов он находится в состоянии насыщения при температуре их теплообменной поверхности.

Поскольку эти две поверхности имеют разную температуру, неодинаково и влагосодержание воздуха около них. Все это приводит к испарению влаги

с поверхности продукта и конденсации ее из воздуха на поверхности охлаждающих приборов.

По мере увеличения скорости движения воздуха в камере уменьшается неравномерность поля относительной влажности и температуры.

Деление способов охлаждения пищевых продуктов на три основные группы не исключает многообразных вариантов режимов охлаждения в пределах каждой группы.

При охлаждении любым способом преследуют две цели:

- охлаждение продукта сразу после производства;
- интенсивное охлаждение.

На скорость охлаждения влияет ряд факторов:

- размеры продукта;
- величина его поверхности;
- масса продукта;
- удельная теплоемкость;
- начальная температура продукта;
- конечная температура продукта и др.

Удельная теплоемкость пищевых продуктов колеблется в пределах 2100...4100 Дж/(кг·К). Чем больше влаги в продукте, тем выше теплоемкость. Например, теплоемкость растительного масла равна 2100 Дж/(кг·К), а для овощей – 4100 Дж/(кг·К).

Пищевые продукты имеют в основном небольшую теплопроводность. Поэтому они охлаждаются относительно медленно. Теплопроводность свиного сала равна 0,14 Вт/(м·К), мяса животных – 0,465 Вт/(м·К).

Охлаждение пищевых продуктов в воздухе сопровождается испарением влаги с поверхности и выделением внутреннего тепла за счет биологических процессов. Таким образом, охлаждение является комплексным процессом тепло- и массообмена.

Процесс замораживания

Замораживанием называется процесс понижения температуры продукта ниже криоскопической, сопровождающийся превращением в лед большей части содержащейся в нем воды. К замораживанию пищевых продуктов прибегают обычно для достижения следующих целей:

- обеспечения стойкости продукта во время длительного хранения;
- отделения влаги при концентрировании жидких пищевых продуктов;
- изменения физических свойств продуктов (твердость, хрупкость и др.) при подготовке их к дальнейшим технологическим операциям;
- сублимационной сушке;
- производства своеобразных пищевых продуктов и придания им специфических вкусовых и товарных качеств (мороженое, пельмени и другие быстрозамороженные продукты).

Основное отличие замораживания от охлаждения состоит в том, что замороженные продукты являются более стойкими при хранении, чем охлажденные, поскольку вода в них превращается в лед. При этом прекращается диффу-

зионное перемещение растворимых в воде веществ и, следовательно, питание микроорганизмов и протекание биохимических (ферментативных) реакций. Эффект замораживания достигается при температуре в центре продукта – 6⁰С и ниже.

Результативный эффект превращения воды в лед родственен эффекту обезвоживания. При этом уменьшается количество влаги, необходимой для жизнедеятельности микроорганизмов и для осуществления биохимических реакций.

Различие по сравнению с сушкой состоит в том, что при замораживании влага превращается в лед, не будучи удаленной из продукта, тогда как при обезвоживании она удаляется.

Замороженный продукт отличается от охлажденного рядом внешних и физических признаков и свойств:

- твердостью – результат превращения воды в лед;
- яркостью окраски – результат оптических эффектов, вызываемых кристаллизацией льда;
- уменьшением удельного веса – следствие расширения воды при замораживании;
- изменением термодинамических характеристик (теплоемкость, теплопроводность, температуропроводность).

В технологическом отношении замораживание вызывает изменения в продукте, препятствующие полному восстановлению первоначальных свойств. Поэтому говорят о неполной обратимости замораживания пищевых продуктов, в отличие от их охлаждения.

При замораживании, в отличие от охлаждения, происходит частичное перераспределение влаги, травмирование тканей продукта кристаллами льда, также иногда частичная денатурация белка.

В общей сложности все это может снизить вкусовые и питательные достоинства продукта, если замораживание осуществлено неправильно.

Замораживая продукт, необходимо стремиться, прежде всего, сохранить его питательные и вкусовые свойства. Для этого нужно добиться максимальной обратимости явлений, происходящих в процессе замораживания.

Механизм вымерзания воды (теория кристаллообразования)

Процесс замораживания тканей – это, прежде всего, процесс замерзания тканевой жидкости, т.е. раствора небольшой концентрации.

Так как в воде продукта растворены минеральные и органические вещества, фазовое превращение начинается при отводе теплоты в момент нарушения состояния переохлаждения. При этом понижение температуры сопровождается соответствующим изменением концентрации раствора.

Криоскопическая температура зависит от концентрации раствора, степени диссоциации растворенных веществ и свойств растворения.

Криоскопическая температура продуктов животного происхождения ниже 0°C : мясного сока: $-1 \dots -1,5^{\circ}\text{C}$; крови: $-0,55 \dots -0,56^{\circ}\text{C}$; яичного белка: $-0,45^{\circ}\text{C}$; яичного желтка: $-0,65^{\circ}\text{C}$.

При замораживании разбавленных растворов вначале вымерзает чистая вода.

Количество воды в мясе убойных животных составляет $53 \dots 75\%$, а в рыбе – $55 \dots 80\%$. По существующей классификации в пищевых продуктах различают связанную (гидратационную) и свободную воду. Содержание связанной воды почти постоянно и составляет около 10% ее общего количества в продукте. Дипольные частицы воды посредством адсорбции прочно связаны с ионами и полимерными группами белков. При замораживании продуктов связанная вода не участвует в фазовых превращениях. Свободная вода находится в межклеточном пространстве продукта и является растворителем минеральных веществ. При температурах ниже криоскопической она превращается в лед. По мере вымораживания свободной воды увеличивается концентрация солей в незамерзшем межклеточном растворе, что приводит к смещению криоскопической температуры в область более низких температур. При этом вымораживание воды происходит постепенно, с повышением концентрации оставшегося раствора. При достижении концентрации, определенной для данного раствора (тканевого сока), он весь застывает в сплошную твердую массу, называемую эвтектикой; температура ее образования называется эвтектической.

В холодильной технологии воду, перешедшую в твердое состояние, принято называть вымороженной. Количество вымороженной воды (W) определяется отношением влаги, перешедшей в лед, к общему ее количеству:

$$W = \frac{G_{\text{л}}}{G_{\text{л}} + G_{\text{в}}}, \quad (6.1)$$

где $G_{\text{л}}$, $G_{\text{в}}$ – количество льда и влаги при данной температуре, в долях единицы.

Экспериментально установлено, что примерно три четверти воды, содержащейся в мясе, рыбе, птице, яйцах, и до половины – в картофеле вымораживается при температуре до -4°C . Считается, что полное вымораживание свободной воды продовольственных продуктов происходит при снижении их температуры до -30°C .

На качество замороженных продуктов большое влияние оказывают размер, форма и распределение кристаллов льда, образующихся в продукте при замораживании. Характер кристаллообразования зависит от состояния клеточных оболочек, концентрации растворенных веществ в клетках, степени гидратации белков и других свойств продукта. Большое значение имеет также скорость замораживания.

Скорость замораживания определяется быстротой продвижения границы раздела между жидкой и отвердевшей фазами от поверхности замораживаемого продукта к его термическому центру. Следует различать среднюю скорость замораживания и номинальную.

Хорошие результаты обеспечивает скорость замораживания, при которой продолжительность действия критических температур не превышает 30 мин.

Существует несколько способов определения скорости замораживания.

Скорость замораживания (v) рассматривается как промежуток времени (τ), необходимый для понижения температуры продукта в пределах некоторого интервала температур Δt :

$$v = \frac{\Delta t}{\tau} \text{ (град/мин)}. \quad (6.2)$$

Иногда под скоростью замораживания понимают скорость вымораживания воды в объекте за какой-то промежуток времени:

$$v = \frac{W}{\tau} \text{ (%/мин)}. \quad (6.3)$$

Наиболее часто среднюю скорость рассматривают как отношение пути к продолжительности прохождения фронта кристаллообразования от поверхности продукта до геометрического центра и выражают в м/ч.

Скорость замораживания зависит от температуры, толщины продукта и способа замораживания. По Планку выражается формулой:

$$\frac{dx}{d\tau} = \frac{t_{кр} - t_0}{\left(\frac{x}{\lambda} + \frac{1}{\alpha}\right) \cdot q \cdot \rho}, \quad (6.4)$$

где $t_{кр}$, t_0 – соответственно криоскопическая температура продукта и температура охлаждающей среды, $^{\circ}\text{C}$; x – определяющий размер продукта, м; λ – коэффициент теплопроводности продукта, Вт/(м·К); α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); удельное количество теплоты, отводимое от продукта при замораживании, кДж/кг; ρ – плотность продукта, кг/м³.

По скорости замораживание подразделяют на:

- медленное (до 1,0 см/ч);
- ускоренное (1,0...6 см/ч);
- быстрое (5...10 см/ч);
- сверхбыстрое (10...100 см/ч).

При медленном замораживании сначала образуются кристаллы льда из внеклеточного тканевого сока относительно невысокой концентрации. Повышенное давление пара над переохлажденной, но еще не затвердевшей жидкостью внутри клетки вызывает диффузию водяного пара через стенки клеток, что приводит к образованию крупных кристаллов льда, травмирующих ткани, медленное замораживание приводит к полной потере свободной воды внутри клеток (процесс криоосмоса или криоконцентрации). В замороженной таким образом ткани внутри клеток, потерявших упругость, находится незамерзший раствор, а весь образовавшийся лед – вне клеток. При этом количество поврежденных клеток превышает 70%.

При быстром замораживании образуются мелкие кристаллы льда, которые равномерно распределены по всей толще замораживаемого продукта. Вода почти без перемещения переходит в лед по месту ее нахождения до заморажи-

вания. При этом травмирующее действие кристаллов на клетки и ткани минимально.

При сверхбыстром замораживании 90% всех кристаллов льда формируются внутри клеток при минимальном повреждении ткани.

Существует несколько теорий, объясняющих механизм повреждения клеток и тканей при замораживании различными повреждающими факторами:

- механический – из-за давления образующихся кристаллов льда на строение тканей;
- осмотический – вследствие чрезмерной дегидратации клеток;
- химический – за счет гиперконцентрации солей как вне, так и внутри клеток.

Все эти факторы являются результатом кристаллизации воды и перехода ее в лед.

В последнее время наибольшее распространение получили две теории – механическая и солевой денатурации.

Механическая теория утверждает, что разрушение клеток вызывается механическим действием кристаллов льда, особенно внутриклеточных.

При медленном замораживании процесс кристаллообразования начинается при определенной температуре (ниже криоскопической) прежде всего в межклеточных и межволоконных пространствах, имеющих более высокую криоскопическую точку из-за меньшей концентрации солей и органических веществ и слабее связанных водой с гидрофильными коллоидами продукта.

Появление кристаллов льда приводит к увеличению концентрации веществ в слое раствора, прилегающем к поверхности кристалла. Вследствие разности концентраций раствора внутри и вне клеток возникают отток влаги из волокон и клеток и намораживание ее на поверхности кристаллов.

Расширение воды при превращении ее в лед приводит к сдавливанию волокон и клеток, что вызывает дополнительный отток воды из них. Этот процесс продолжается до тех пор, пока температура не станет достаточно низкой, чтобы началось кристаллообразование внутри волокон и клеток, где останется уже небольшое количество влаги в концентрированном растворе.

При быстром замораживании теплоотвод происходит более интенсивно. Прежде чем успеет интенсивно развиваться миграционный процесс, температура внутри волокон и клеток становится достаточно низкой, чтобы там в соответствии с концентрацией раствора началось кристаллообразование. Таким образом, быстрое замораживание приводит к затвердеванию влаги без значительного перераспределения ее.

Повышение скорости замораживания сокращает миграцию влаги, вызывает образование большого количества мельчайших кристаллов, равномерно размещенных как в межклеточном пространстве, так и в самих клетках.

Если температуру понижать очень быстро ($v \geq 100$ град/мин) до $-120\dots -160$ °C и ниже, кристаллизация почти не происходит. Вода приобретает стекловидное состояние. Температура, при которой скорость роста кристаллов уменьшается, равна приблизительно -90 °C.

Стекловидное состояние отличается от кристаллического тем, что молекулы вещества распределяются хаотически, а не по определенному стереометрическому плану, как это происходит при кристаллизации.

При стекловидном состоянии ткань приобретает некоторые свойства твердого тела. Это состояние менее устойчиво в термодинамическом смысле, поэтому со временем при небольшой температуре наблюдается постепенный переход из стекловидного к кристаллическому состоянию, сопровождающийся небольшим выделением теплоты (девитрификация).

Стекловидную массу можно сохранить только при температуре ниже -130°C .

При быстром нагревании стекловидное состояние может перейти в жидкое, минуя кристаллическое. Таким образом, минуя структурный распад, который наступает после внутриклеточной кристаллизации, а также при внутренней миграционной перекристаллизации после первоначального процесса замораживания можно с помощью сверхбыстрого охлаждения предотвратить гибель клеток и достигнуть обратимости процесса, от которого зависит максимальное сохранение качества продукта.

Теория солевой денатурации основывается на том, что в процессе льдообразования происходит перераспределение влаги в ткани и увеличивается концентрация солей в клетках.

Под действием повышенной концентрации солей и ряда химических и коллоидных процессов происходят денатурационные изменения белковых веществ.

При медленном замораживании концентрация солевых растворов в продукте выше и время их воздействия больше. А степень денатурации белков зависит от времени воздействия на них гипертонических растворов. При сверхбыстром замораживании это время сводится к минимуму.

Денатурация белков происходит при температурах, близких к точке эвтектике растворов, и падении рН. Изменение величины рН в биологическом объекте при замораживании приводит к изменениям активности ферментов и скорости денатурации белка.

Однако не всегда быстрое замораживание обеспечивает высокое качество продукта. Так, замораживание некоторых видов пищевых продуктов (большого объема) в криогенных жидкостях протекает с большой скоростью, но одновременно в продукте очень сильно повышается внутреннее давление замерзшего клеточного сока. Рост давления внутри замораживаемого продукта тем больше, чем больше его размеры, быстрее проводится замораживание и больше разность температур между внешним и внутренним слоями продукта. Особенно высокое внутреннее давление создается при замораживании сверхбыстрым способом.

Результат этого – повреждения внешних перемороженных слоев продукта, причем они не связаны с повреждениями, обусловленными образованием крупных кристаллов при медленном замораживании. Эти повреждения происходят, когда температура на поверхности продукта становится намного ниже криоскопической, а в центральных слоях еще отмечается стадия льдообразова-

ния. Увеличение объема центральных замерзающих слоев приводит к возрастанию внутреннего давления в продукте, и, когда плотный, неэластичный внешний ледовый слой не в состоянии выдержать внутреннее давление, происходит разрыв замораживаемого продукта.

Решающее значение на скорость замораживания оказывают:

- температура охлаждающей среды;
- толщина замораживаемого продукта;
- коэффициент теплоотдачи от его поверхности.

Скорость замораживания влияет и на процессы массообмена, приводящие к усушке продукта. Пока на поверхности продукта не началось льдообразование, с нее испаряется капельно-жидкая влага, а затем происходит сублимация льда, что и приводит к его усушке. Потери воды при замораживании могут колебаться в широких пределах – от 0,3 до 2% и более в зависимости от температуры охлаждающей среды, начальной и конечной температуры продукта, вида среды, метода и скорости замораживания, а также специфических свойств отдельных продуктов.

Для представления массообмена используют различные математические модели, описывающие явление испарения влаги с поверхности продукта (основаны на законе Дальтона), однако они включают большое количество величин, определение которых затруднено. Поэтому массообмен в холодильной камере можно определять не по величине массы влаги, отданной продуктом, а по массе влаги, усвоенной воздухом в зависимости от его температуры, давления и равновесной влажности.

Из термодинамики влажного воздуха следует, что количество массы влаги (ΔG), усвоенной воздухом, зависит от количества теплоты, подведенной к нему, температуры и относительной влажности воздуха:

$$\Delta G = \frac{Q \cdot (1/\varepsilon_d)}{r(t)}, \quad (6.5)$$

где Q – количество теплоты, воспроизведенное за счет сухого и влажного теплообмена, кВт; ε_d – коэффициент влагопереноса; $1/\varepsilon_d$ – доля теплоты, затраченная на массообмен; $r(t)$ – скрытая теплота испарения, зависящая от температуры, кВт/кг.

Усушка резко снижается, если на поверхности продукта имеется влагонепроницаемый слой (корочка подсыхания, слой жировой ткани). При измельчении продуктов усушка резко возрастает. Потери при замораживании плодов и овощей зависят от их размера, характерных свойств кожицы, а также техники замораживания.

При замораживании бесконтактным способом в паронепроницаемой упаковке исключаются потери водяного пара через слой упаковочного материала. Однако при наличии свободных пространств между продуктом и упаковкой на внутренней поверхности упаковочного материала образуется иней в результате конденсации и замерзания водяного пара (внутренняя усушка).

При любом способе и скорости замораживания в клетке могут происходить сложные изменения, связанные с нарушением ее структуры. Так, понижение температуры продукта до $-8 \dots -10$ °С сопровождается интенсивным льдо-

образованием и, следовательно, резким увеличением концентрации химических соединений в жидкой фазе продукта, уменьшением ее объема, сближением молекул. При этом создаются условия для структурных перестроек белковых молекул, возникновения межмолекулярных реакций, агрегации. Нарушения пространственной структуры микрочастиц белков идентифицируются с денатурацией, а ее внешним проявлением является выделение тканевого сока при размораживании. Развитие этих процессов стимулирует повышение концентрации электролитов в жидкой фазе. Зона максимального развития денатурационных изменений совпадает с температурной зоной максимальной кристаллизации тканевого раствора. Денатурация наблюдается, прежде всего, в белках фракции актомиозина при отсутствии изменений белков саркоплазмы.

Важным фактором, влияющим на сохранение нативной структуры белков, является связанная вода. Однако это касается только воды, связанной с белками тех групп, в которых энергия связей выше энергии, высвобождающейся при переходе в кристаллическую структуру льда. Белковые вещества с более низкой энергией связи теряют воду, которая вымораживается, а молекулы белка агрегируются. Стабильные белковые вещества удерживают воду, которая позволяет им сохранить нативную структуру и после размораживания.

Процессы денатурации белков при замораживании в определенной степени замедляются физическими изменениями образовавшегося раствора, в частности, изменениями вязкости, ионной силы, давления водяных паров и рН. При введении некоторых веществ (этиленгликоль, пропиленгликоль, сахар, глицерин) процесс денатурации замедляется. Предполагается, что эти вещества усиливают прочность водородных мостиков и связей воды. При введении их снижается количество вымораживаемой воды.

В настоящее время разрабатываются пищевые системы, включающие замораживаемый продукт и структурирующие вещества, состоящие из натуральных пищевых компонентов. Использование таких пищевых систем позволяет получить сырье для замораживания, которое не теряет высокой биологической ценности при температуре замораживания – 20 °С, длительном хранении в замороженном виде и исключает потери при размораживании.

Изменение белков продуктов происходит также в результате их гидролиза под действием тканевых ферментов, которые высвобождаются при повреждении клеток.

Изменения жиров при замораживании и хранении являются результатом ферментативных и окислительных процессов. С понижением температуры замораживания скорость химических реакций резко замедляется, соответственно замедляются и химические процессы порчи жиров. Скорость ферментативных процессов при понижении температуры в определенном интервале может и возрасти.

При замораживании снижаются количество и активность микроорганизмов, однако добиться их полного уничтожения невозможно. Устойчивость микробной клетки к замораживанию зависит от вида микроорганизма, стадии его развития, среды обитания, а также скорости и температуры замораживания.

Получение высококачественных замороженных продуктов возможно только при исходном высоком качестве сырья, которое определяется многими факторами:

- условиями роста, кормления;
- упитанностью;
- физиологическим состоянием животного перед убоем;
- совершенством операций по убою и разделке туш.

Критерием качества мясного сырья принято также считать степень развития в сырье послеубойных процессов.

Мясо, замороженное в стадии ооченения, имеет более низкое качество, так как белки обладают наименьшей растворимостью, набухаемостью и влагоудерживающей способностью. Замороженное парное мясо имеет высокую степень обратимости, а белки – хорошую набухаемость и влагоудерживающую способность, так как резко тормозятся автолитические процессы, не наблюдается также изменений гистологической структуры тканей. Такое мясо обладает наилучшими потребительскими свойствами.

Существенным фактором, определяющим качество сырья и его стойкость при последующем хранении, является конечная температура продукта. При ее снижении уменьшаются потери белковых и экстрактивных веществ с мясным соком. Так, мясо животных или рыбы, замороженное до $-50 \dots -70^{\circ}\text{C}$, а затем размороженное, незначительно отличается по показателям качества от мяса, не подвергавшегося замораживанию.

В то же время различия в качестве продуктов, замороженных разными методами, после нескольких месяцев хранения при температуре -20°C практически исчезают вследствие рекристаллизации. Движущей силой этого процесса может быть колебание температуры во время хранения, а также разность давлений водяных паров на поверхности мелких и крупных кристаллов. На поверхности мелких кристаллов давление водяных паров всегда выше, вследствие чего происходит миграция влаги от более мелких кристаллов к крупным. При низких температурах процесс рекристаллизации протекает медленно, но по мере повышения рекристаллизация заметно ускоряется.

При всем многообразии способов замораживания к каждому продукту требуется индивидуальный подход при определении метода и технического средства замораживания.

Подмораживание пищевых продуктов

Подмораживание заключается в понижении температуры продуктов немного ниже криоскопической для улучшения условий их хранения. Поскольку понижение температуры продуктов сопровождается некоторым льдообразованием, термин «переохлаждение» не точен. Более правильно – «подмораживание».

Наиболее широко подмораживанием пользуются для сохранения рыбы, мяса и плодов.

Существует два основных пути подмораживания продуктов:

- продукт помещают в камеру, где поддерживается температура до -3°C . Температура продукта постепенно понижается, приближаясь к температуре воздуха камеры. Так подмораживают рыбу, птицу, мясо, зимние сорта яблок;

- продукт помещают в морозильную камеру, где замораживается периферийный слой ограниченной толщины. После перемещения продукта в камеру хранения с температурой $-2\dots-3^{\circ}\text{C}$ вследствие внутреннего теплообмена во всем объеме продукта устанавливается температура, одинаковая с температурой хранения. Этот способ рекомендуется для подмораживания мяса и рыбы, причем подмораживать рыбу можно контактным способом в рассоле.

Исследования показали, что в подмороженных продуктах при хранении происходят те же внутренние изменения, что и при охлаждении, но протекают они медленнее и поэтому продолжительность хранения в подмороженном состоянии может быть больше, чем в охлажденном. Отмечено, что усушка при этом оказывается меньше, а качество продуктов существенно не отличается от качества охлажденных продуктов.

При подмораживании продуктов в морозильных камерах с последующим внутренним теплообменом до выравнивания температур в объеме продукта происходят теплофизические процессы, существенно отличные от происходящих при медленном подмораживании. Такой процесс делится на два взаимосвязанных этапа.

На первом этапе при интенсивном отводе теплоты замораживается слой некоторой толщины, и в продукте создается резко неравномерное температурное поле.

На втором этапе происходит внутренний теплообмен в продукте при очень слабом теплообмене с воздухом камеры хранения. Это приводит к приблизительному равенству температуры продукта и камеры. Внутренний теплообмен в продукте можно рассчитывать как адиабатный.

Интенсивный отвод теплоты от продукта на первом этапе приводит к быстрому замораживанию периферийного слоя, что благоприятно в технологическом отношении и удобно организационно, так как время, необходимое для пребывания продукта в морозильной камере, невелико. Последнее обстоятельство позволяет выполнить в непрерывном потоке подмораживание таких продуктов, как мясные полутуши и четвертины. Нет необходимости ограничивать на первом уровне понижение температуры поверхности мяса из-за опасения уменьшить обратимость процесса.

Температура поверхности должна быть такой, чтобы после выравнивания температура в толще была $-1\dots-2^{\circ}\text{C}$.

Таким образом, чем интенсивнее процесс теплообмена на первом этапе, тем совершеннее процесс в технологическом и организационном отношении.

6.7. Теплофизические свойства пищевых продуктов и их изменения

К наиболее важным теплофизическим свойствам пищевых продуктов относят: удельную теплоемкость, теплопроводность, температуропроводность,

удельную энтальпию, криоскопическую температуру, плотность, равновесное давление пара.

Вымораживание воды в биологических системах при понижении их температуры ниже криоскопической существенно изменяет теплофизические свойства продуктов. Основной причиной изменения этих свойств при замораживании является превращение воды в лед, так как свойства сухих веществ практически постоянны.

Удельная теплоемкость – величина, численно равная количеству теплоты, необходимому для нагревания или охлаждения 1 кг вещества на 1⁰С (1 К).

Если известны состав продуктов питания и удельная теплоемкость отдельных компонентов, то удельную теплоемкость продукта рассчитывают по закону аддитивности:

$$c = n_1c_1 + n_2c_2 + \dots + n_nc_n, \quad (6.6)$$

где n_1, n_2, \dots – массовые доли компонентов; c_1, c_2, \dots – удельные теплоемкости компонентов, Дж/(кг·К).

Продукты условно считаются двухкомпонентными системами, состоящими из воды и сухих веществ, тогда удельную теплоемкость определяют по формуле:

$$c = c_w w + c_c(1 - w), \quad (6.7)$$

где c_w, c_c – удельные теплоемкости воды и сухих веществ, Дж/(кг·К); $w, (1 - w)$ – массовые доли воды и сухих веществ.

Теплоемкость сухих веществ большинства продуктов животного происхождения колеблется в пределах 1,34 ... 1,68 Дж/(кг·К), растительных – около 0,91 Дж/(кг·К). При отсутствии экспериментальных данных эти значения можно применять для оценки теплоемкости продуктов.

Изменение удельной теплоемкости продуктов в интервале температур замораживания определяется в основном начальным влагосодержанием продукта и количеством вымороженной воды. Теплоемкость убывает с понижением температуры, стремясь к нулю при абсолютном нуле температуры (третий закон термодинамики).

Теплопроводность – процесс переноса тепловой энергии от более нагретых участков тела к менее нагретым в результате теплового движения и взаимодействия микрочастиц. Количественно теплопроводность характеризуется **коэффициентом теплопроводности**, который численно равен количеству теплоты, переносимому через единицу площади поверхности в единицу времени при градиенте температуры, равном единице:

$$\lambda = \lambda_w w + \lambda_c(1 - w), \quad (6.8)$$

где λ_w – коэффициент теплопроводности воды, обычно принимаемый 0,60 Вт/(м·К); λ_c – коэффициент теплопроводности сухих веществ, принимаемый 0,26 Вт/(м·К).

Значения коэффициента теплопроводности, рассчитанные по данной формуле, являются приближенными, поэтому ими пользуются только при отсутствии экспериментальных данных.

Теплопроводность продуктов с понижением температуры остается практически постоянной до начала замерзания, а затем увеличивается, так как коэффициент теплопроводности льда в четыре раза больше, чем воды. Увеличение теплопроводности продукта при понижении температуры практически завершается с окончанием льдообразования.

Температуропроводность. При охлаждении и замораживании продуктов, как и при их нагревании, действуют механизмы переноса продуктом тепловой энергии. В результате в продукте перемещается температурный фронт. Скорость этого перемещения характеризуется **коэффициентом температуропроводности**:

$$a = \lambda / (c\rho) = \lambda / c_{об} \quad (6.9)$$

где a – коэффициент температуропроводности продукта, $\text{м}^2/\text{с}$; λ – коэффициент теплопроводности продукта, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; c – удельная массовая теплоемкость продукта, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; ρ – плотность продукта, $\text{кг}/\text{м}^3$; $c_{об}$ – удельная объемная теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{м}^3\cdot\text{К})$.

Таким образом, температуропроводность равна тому повышению температуры, которое произойдет в единице объема данного вещества, если ему сообщить количество теплоты, численно равное его теплопроводности.

При положительных температурах температуропроводность продукта практически неизменна, но с началом льдообразования она резко уменьшается. Это вызвано выделением теплоты кристаллизации. При дальнейшем понижении температуры вследствие роста теплопроводности и уменьшения теплоемкости температуропроводность увеличивается и достигает максимального постоянного значения, когда вода полностью переходит в лед.

Энтальпия. Это однозначная функция состояния термодинамической системы, измеряемая в $\text{Дж}/\text{кг}$. Данными об изменении энтальпии продовольственных товаров в холодильной технологии пользуются обычно для определения отведенной или подведенной теплоты при холодильной обработке продуктов. Энтальпию отсчитывают при какой-либо начальной температуре (обычно – 20°C), при которой ее значение принимается за 0.

Криоскопическая температура. Это температура начала замерзания жидкой фазы продуктов. Тканевый сок продовольственных продуктов представляет собой диссоциированный коллоидный раствор сложного состава, которому соответствует криоскопическая температура – $0,5\dots - 5^\circ\text{C}$.

Плотность. Она представляет собой отношение массы продукта к его объему. Плотность продуктов при замораживании уменьшается тем больше, чем больше воды они содержат и чем ниже температура, которая достигается при замораживании. Это объясняется тем, что вода в тканях, превратившись в лед, увеличивается в объеме при неизменной массе. Учитывая, что изменение плотности при замораживании, как правило, не превышает $5\dots 8\%$, при расчетах ее условно можно считать постоянной. Плотность большинства скоропортящихся продуктов составляет около $1000 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Равновесное давление пара над поверхностью продукта p_n из-за содержания во влаге продуктов растворенных веществ (сахара, соли и др.) несколько

ниже давления насыщенного пара p_n при той же температуре даже при полном насыщении.

Отношение давления пара воды, содержащейся в продукте, к давлению пара чистой воды (или льда) при той же температуре называется **относительным понижением давления водяного пара**:

$$\alpha_w = p_p/p_n, \quad (6.10)$$

где α_w – коэффициент термодинамической активности воды, называемый иногда величиной водной активности.

Эта величина, выраженная в процентах ($\alpha_w = 100\%$), определяет равновесную относительную влажность воздуха, при которой продукт не теряет и не получает влаги. Величина равновесной относительной влажности зависит от природы продукта и является функцией его температуры, т.е. гигротермической характеристикой продукта.

Температурные графики замораживания характеризуют изменения температуры в различных точках продукта во времени и различаются в зависимости от размеров и теплофизических свойств замораживаемых продуктов, а также от интенсивности теплоотвода (рисунок 6.1).

По внешнему виду и с точки зрения процессов, протекающих в продуктах, каждый такой график можно разделить на три участка.

Первый участок графика будет соответствовать охлаждению продукта (различных его частей) до криоскопической температуры. Причем крутизна этого участка определяется быстротой отвода теплоты от продукта.

На втором участке снижение температуры замедляется вследствие выделения скрытой теплоты льдообразования, и наклонная кривая может переходить в пологую или даже горизонтальную линию. Замедление снижения температуры для большинства продуктов характерно в диапазоне температур от -1 до -5°C , которые называются критическими, так как именно в этот период в продуктах происходят наиболее существенные изменения в результате вымораживания воды и увеличения концентрации солевых растворов.

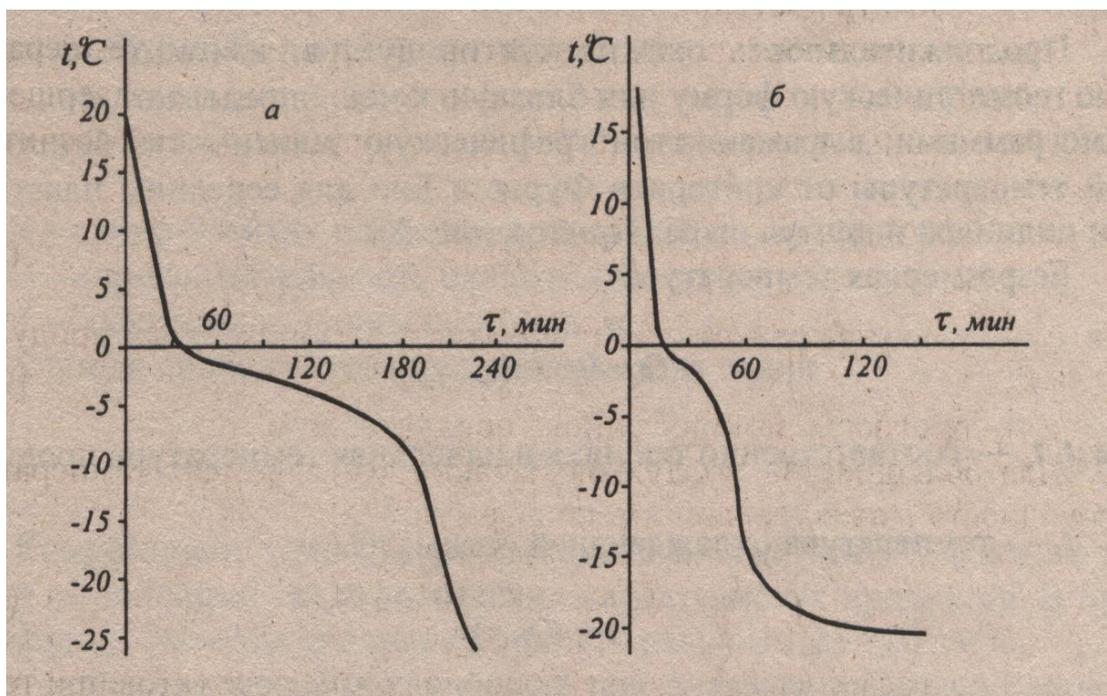


Рисунок 6.1 - Температурные графики замораживания рыбы:
 а – на воздухе при температуре -35°C и скорости циркуляции воздуха 5 м/с;
 б – в растворе хлористого натрия при температуре -20°C .

Одна из основных целей интенсификации процесса замораживания – быстрое прохождение именно этого участка, что достигается применением быстрых и сверхбыстрых способов замораживания.

Третий участок графика показывает изменение температуры после перехода основной части воды в твердокристаллическое состояние. Изменение теплофизических свойств продуктов (увеличение теплопроводности и температуропроводности) стимулирует процесс отвода теплоты от его внутренних слоев, что отражается на графике увеличением наклона кривой.

6.8. Отопление и размораживание

Перед употреблением охлажденные, подмороженные и замороженные продукты подвергают соответствующей обработке, целью которой является доведение их до состояния, близкого к исходному.

Отопление и размораживание – заключительные операции в непрерывной холодильной цепи, осуществляемые непосредственно перед выпуском пищевых продуктов в розничную торговлю, перед промышленной или кулинарной обработкой.

Цель этих операций – приведение продукта в состояние, удобное для дальнейшего использования его и как можно более близкое к состоянию, свойственному натуральному продукту высокого качества. Учитывая, что отопление – это процесс, обратный охлаждению, а размораживание (дефростация) – про-

цесс, обратный замораживанию, стремятся достичь максимальной обратимости этих процессов.

Отепление охлажденных продуктов

Отепление пищевых продуктов представляет собой процесс постепенного повышения температуры продукта до температуры окружающего воздуха при максимально полном сохранении его качества.

Отепление позволяет предотвратить отпотевание (конденсация влаги из воздуха на их более холодную поверхность) продуктов при переходе из холодной среды в теплую и соответственно обсеменение их микрофлорой из воздуха.

Некоторые продукты не нуждаются в отеплении, так как конденсирующаяся на их поверхности при повышении температуры влага не причиняет им вреда (соленые рыбные товары, сливочное масло и др.). Не нуждаются в отеплении и продукты в герметичной упаковке при условии их быстрого употребления при изъятии из нее.

Для таких же продуктов, как плоды, баночные консервы, отепление необходимо.

Обычно отепление проводят в воздушной среде, регулируя в ней количество водяных паров и по возможности обеспечивая стерильность.

Отепление продуктов, осуществляемое в результате теплообмена с нагретым воздухом, следует проводить так, чтобы избежать на поверхности продукта точки росы.

Точка росы – температура, охлаждаясь до которой при постоянном влагосодержании воздух становится насыщенным водяными парами.

Влагосодержание – масса водяных паров, приходящаяся на 1 кг сухого воздуха.

В то же время сухой воздух вызывает значительную усушку продукта, что также нежелательно. Поэтому при отеплении влагосодержание и скорость движения воздуха по мере повышения температуры поверхности продукта регулируют так, чтобы обеспечить хороший теплообмен, избежать перегревания поверхности продукта и приблизить состояние воздуха при температуре поверхности продукта к состоянию насыщения водяными парами. Отепление заканчивается, когда температура поверхности продукта становится такой, что при перемещении продукта в новые условия исключается поверхностная конденсация влаги.

Проводят отепление в камерах, оборудованных установками или устройствами для кондиционирования воздуха. Кондиционеры, обеспечивающие необходимые параметры циркулирующего воздуха, оборудованы последовательно включенными воздухоохладителем и калорифером. Воздух из камеры при помощи вентилятора поступает в кондиционер, где охлаждается и подсушивается в воздухоохладителе до необходимого влагосодержания, а затем он переходит в калорифер, где подогревается до нужной температуры и после этого вновь направляется в камеру отепления. Здесь воздух отдает теплоту продукту, повышая его температуру, а сам охлаждается и несколько увлажняется.

Во время отепления ускоряются физические, физико-химические, биохимические и микробиологические процессы. Для задержки развития микроорганизмов при отеплении применяют фильтрацию воздуха, озонирование, УФ-облучение и др.

Техника отепления различных продуктов в основном одинакова. Продукты размещают так, чтобы была обеспечена свободная циркуляция воздуха. Продукты в упаковке укладывают в штабель в шахматном порядке с прокладкой реек между рядами. Продукты без упаковки располагают в том же порядке, как и при их хранении, - на подвесных путях и стеллажах. Совместное отепление продуктов с резкими специфическими запахами с другими продуктами недопустимо.

Для отепления продукта должна быть подведена теплота, количество которой равно расходу холода при охлаждении того же продукта в том же количестве и в одинаковом по величине температурном интервале. Теплота, подводимая к продукту при отеплении в воздухе, расходуется не только на нагревание продукта, но и на испарение влаги с его поверхности.

Продолжительность отепления зависит от:

- размеров продукта,
- вида тары,
- упаковки,
- их теплофизических свойств,
- температуры и скорости движения воздуха,
- начальной и конечной температуры продукта.

На практике плоды и овощи при отеплении перемещают из холодильной камеры в коридоры или специальную камеру, где температуру воздуха постепенно повышают и через 12...15 часов перемещают в помещение с температурой 18...20⁰С.

Отепление переохлажденных плодов и овощей продолжается от нескольких суток до нескольких недель. Только такой режим позволяет достичь максимальной обратимости процесса и обеспечить высокое качество продукции.

Размораживание пищевых продуктов

Размораживанием называют технологический процесс превращения льда, содержащегося в мороженых продуктах, в жидкую фазу.

Размораживание продуктов является заключительным технологическим процессом холодильной обработки, в течение которого происходит повышение температуры замороженного продукта. Процесс размораживания по теплофизической сущности можно рассматривать как процесс, обратный замораживанию.

Размораживают почти все мороженые продукты, кроме тех, которые могут быть реализованы в мороженом виде (мясо, рыба, мороженое и др.). Однако перед поступлением в торговую сеть продукты размораживать не рекомендуется, так как даже при непродолжительном хранении в размороженном состоянии может ухудшиться их товарный вид.

Размораживание быстрозамороженных продуктов в мелкой фасовке, как правило, совмещают с их кулинарной обработкой.

Изменения, происходящие в продуктах в процессе размораживания

Следует учитывать, что при замораживании и последующем хранении продукты под влиянием различных процессов претерпевают изменения (часто необратимые). Поэтому исходные свойства продуктов при размораживании восстанавливаются не полностью.

Размораживание протекает более медленно по сравнению с замораживанием при одной и той же разности температур, что связано с тем, что условия теплопередачи различны для льда и воды. Для обеспечения фазового перехода льда в воду необходим приток очень большого количества теплоты. В то же время теплопроводность льда в 4 раза больше теплопроводности воды. При замораживании сначала замерзают поверхностные слои, их теплопроводность увеличивается, повышается теплообмен, что и ускоряет процесс замораживания. При размораживании, напротив, в первую очередь размораживаются поверхностные слои, что приводит к резкому снижению теплопроводности и теплообмена и соответственно уменьшению скорости самого процесса. Так, если время замораживания продукта составляет 28 минут, то время размораживания – около 52 минут. Замедление процесса в основном приходится на самый критический диапазон температур – в районе точки плавления льда. При размораживании (особенно крупных объектов) это связано с перекристаллизацией, что может вызвать дополнительное повреждение тканей.

На качество размороженного продукта существенно влияют скорость и конечная температура замораживания: качество продуктов, быстро замороженных при низких температурах (-30°C и ниже), сохраняется лучше, чем продуктов при медленном замораживании. Для сохранения высокого качества быстрозамороженный пищевой продукт необходимо так же быстро разморозить.

Воздействие процессов замораживания и размораживания на качество продуктов в размороженном состоянии исследователи объясняют с позиций теории кристаллизации воды. Скорость замораживания является решающим фактором, влияющим на количество, размеры и равномерность распределения кристаллов льда в тканях. От размеров кристаллов зависит степень сохранения целостности естественной структуры тканей.

Если кристаллы льда невелики и их размещение примерно соответствует естественному распределению жидкости в мышечной ткани, то коллоидные системы продуктов не претерпевают значительных изменений и полнее восстанавливаются после размораживания.

Степень разрушения структурных элементов тканей зависит также от глубины автолитических процессов в момент замораживания. Кроме того, в процессе хранения происходит увеличение кристаллов льда, дальнейшее углубление автолитических процессов, явление «старения» белковых коллоидных систем и мембран клеток.

Изменения коллоидной структуры тканей, вызываемое перераспределением воды и увеличением концентрации жидкой фазы при замораживании, отражаются на величине влагосвязывающей способности после их размораживания.

Основными причинами, вызывающими образование и обильное вытекание клеточного сока при замораживании-размораживании, являются:

- денатурация белков в результате отделения воды от белковой субстанции;
- рост концентрации минеральных веществ в растворах, содержащихся внутри и вне волокон;
- механическое воздействие кристаллов льда из стенки мышечных волокон и на соединительнотканые межволоконные прослойки и т.д.

Степень воздействия указанных факторов определяется скоростью кристаллообразования и глубиной фазового превращения воды. Максимальное количество воды переходит в лед при замораживании продуктов при температуре от -1 до -5°C . В связи с этим интенсивность теплообмена при прохождении температурной зоны от -1 до -5°C при замораживании и от -5 до -1°C при размораживании имеет большое значение для получения размороженного продукта высокого качества.

Чем быстрее пройден этот температурный интервал при замораживании и размораживании, тем меньше вытечет мясного сока из размороженного мяса при его разделке, тем лучше будет его качество.

Изменения, происходящие в пищевом продукте на всех этапах холодильной обработки (охлаждение, замораживание и хранение), становятся заметными только в размороженном состоянии и проявляются в вытекании клеточного сока. Количество и состав вытекшего сока определяют характер изменений, происшедших в продукте при его холодильной обработке. Естественно, что характер и глубина этих изменений зависят как от условий холодильной обработки, так и от способа и скорости размораживания.

Для того чтобы восстановилось содержание влаги в ткани, влага должна сначала пройти фазовое превращение (лед – вода), а затем проникнуть и восстановиться в тех белковых субстанциях и коллоидных системах, из которых она диффундировала в межклеточное и межволоконное пространство при замораживании и хранении с помощью диффузионно-осмотических сил. Способность белковых субстанций и коллоидных систем поглощать и связывать эту влагу определяется их биологической активностью, которая зависит от режимов холодильной обработки продуктов, включая и размораживание.

В начальный период медленного размораживания мышечная ткань оказывается под воздействием концентрированных солевых растворов, что вызывает частичную денатурацию белков и разрушение коллоидных систем. Последние способствуют, в свою очередь, образованию и вытеканию сока после размораживания и во время последующей обработки. Кроме того, при медленном размораживании быстрозамороженных продуктов сначала происходит укрупнение кристаллов льда, которое сопровождается повреждением структуры ткани и способствует вытеканию сока из продуктов.

При быстром размораживании действие концентрированных растворов менее выражено, чем при медленном, поэтому наблюдается лишь незначительное выделение сока. Отсюда следует, что сочетание медленного замораживания с медленным размораживанием в значительной степени снижает качество продукта.

Интенсификация процесса путем повышения разницы температур за счет применения более теплой среды может привести к возникновению местных перегревов поверхности, что отрицательно сказывается на качестве продукта. При повышении температуры может также произойти микробная порча поверхностных слоев продукта до размораживания внутренних слоев.

Окончание процесса размораживания определяют по криоскопической температуре в тепловом центре продукта. Конечная же температура размороженного продукта зависит от его целевого назначения (употребление, кулинарная обработка, на производство других продуктов и др.).

Количество теплоты, необходимое для полного размораживания продукта, определяется по формуле:

$$Q = G[c_m(t_{кр} - t_n) + 80W\omega + c_0(t_k - t_{кр})], \quad (6.11)$$

где G – масса продукта, кг; c_m , c_0 – удельная теплоемкость продукта до и после размораживания, ккал/(кг·К); t_n , t_k – начальная и конечная температура продукта, °С; $t_{кр}$ – криоскопическая температура, °С; W – содержание воды, %; ω – степень вымораживания воды, %.

Как следует из формулы (6.11), количество теплоты, которое необходимо подвести к продукту, состоит из теплоты, необходимой для повышения его внутренней температуры до криоскопической, теплоты таяния и теплоты, требуемой для повышения температуры уже размороженного продукта до заданной конечной.

На практике этот расчет можно провести гораздо проще – по разности энтальпий продукта. Фактически среднее количество теплоты, необходимое для размораживания говядины и свинины при начальной температуре -8°C , колеблется в пределах 226,8...201,6 кДж/кг, а при температуре -18°C ее количество возрастает примерно на 20%.

Классификация методов размораживания пищевых продуктов

Предприятия пищевой промышленности применяют в настоящее время несколько способов размораживания, при которых теплоносителями являются воздух, паровоздушная среда, вода и рассол. Известны также способы размораживания с помощью ультразвука, инфракрасных лучей, электрического тока высокой, сверхвысокой и промышленной частоты и под вакуумом.

В отличие от отепления, которое проводят исключительно в воздухе с контролируемыми параметрами, размораживание возможно в различных средах и при использовании разнообразных источников теплоты.

Существующие способы размораживания могут быть разбиты на три основные группы.

К *первой группе* относятся все методы, основанные на использовании теплопередающей среды (теплоносителя) с различными теплофизическими свойствами, при введении которых всегда имеет место температурный градиент, т.е. используется конвективный нагрев паровоздушной смесью, в жидкости, в среде насыщенных паров и т.п.

Вторая группа – методы размораживания, в основе которых нагрев путем преобразования энергии того или другого вида в тепловую непосредственно в обрабатываемом продукте. К таким видам энергии относится энергия электрического поля различной частоты и энергия ультразвуковых колебаний. С использованием энергии переменного электрического поля нагрев продукции при определенных условиях может осуществляться равномерно по всему объему, т.е. происходит безградиентный нагрев.

В *третью группу* входят комбинированные методы, использующие одновременно конвективный и безградиентный нагрев.

При комбинированном способе размораживания может использоваться воздушный, микроволновый, вакуумный, электродный и другой нагрев.

Для пищевых продуктов с тканевой структурой (мясо, рыба, птица) наиболее важным показателем обратимости свойств при размораживании является величина потерь сока. Потери сока рассматриваются как внешний признак денатурации белковых веществ. Основным компонентом сока является вода, которая не поглощается продуктом при размораживании, а также вода, выделяющаяся из продукта под воздействием сжатия при размораживании. Выделение сока из продуктов может сопровождаться значительными потерями растворимых веществ – витаминов, ферментов, минеральных веществ, белков саркоплазмы и др.

Потери сока при размораживании мяса зависят от его вида. Так, максимальные потери сока отмечаются в говядине, более низкие – в телятине и баранине, минимальные – в свинине. При этом потери сока мяса более высокого качества при размораживании, как правило, ниже, чем низкокачественного. В целом количество мясного сока составляет около 5% общего количества замороженного мяса, у не полностью созревшего мяса может увеличиваться до 40%. Однофазное замораживание, проводимое до начала развития процессов постмортного окоченения, замедляет развитие гликогенолиза и явления сжатия при размораживании, связанного с повышенным выделением сока.

Потери сока при размораживании мяса птицы зависят от физиологического состояния мышц, в момент замораживания они максимальны на стадии окоченения и менее значительны на других стадиях. Зависят они также от скорости замораживания. При медленном замораживании в воздухе потери увеличиваются в 3 раза по сравнению с иммерсионным методом.

Потери сока при размораживании рыбы подчиняются тем же закономерностям, что и при размораживании мяса, но в целом они выше, чем у мяса. Величина потерь зависит от вида рыбы, ее жирности, расположения мышц в тушке, формы рыбы и др.

Качество размороженных плодов зависит от их вида, сорта, условий хранения, в некоторых случаях методы замораживания имеют второстепенное значение. В то же время установлено, что для многих плодов и ягод наиболее оптимальным является метод диэлектрического размораживания, а наименее – воздушный. При оценке качества плодов и ягод, размороженных различными методами, установлено, что диэлектрически размороженная продукция отличалась более высоким содержанием неповрежденных плодов, лучшей консистенцией, меньшими потерями витамина С.

Интенсивность качественных изменений в размороженных продуктах обусловлена, прежде всего, динамикой микробиологических и ферментативных процессов. В зависимости от многих взаимовлияющих факторов активность последних может как увеличиваться, так и уменьшаться. В продуктах животного происхождения воздействие тканевых ферментов проявляется в основном ростом гидролитического распада белков, в результате которого создаются благоприятные условия для развития гнилостной микрофлоры.

Микробиологические процессы в быстрозамороженном мясе протекают после размораживания почти с такой же скоростью, что и в охлажденном мясе при тех же условиях хранения. Конденсация водяного пара при размораживании вызывает ускоренное развитие микроорганизмов, а в медленно замороженном мясе эти процессы протекают быстрее, что объясняется большей ферментативной активностью такого мяса.

Сохраняемость плодов и овощей после размораживания меньше, чем продуктов животного происхождения, поскольку они обладают меньшей стойкостью по отношению к микробиологическим и биохимическим процессам. Поэтому размороженные продукты вследствие быстрой порчи и ухудшения товарного вида в розничную торговлю не поступают. Они должны быть максимально быстро использованы или переработаны.

Анализ различных методов размораживания показывает, что при применении любого теплоносителя (воздух, вода) ускорение процесса ограничено. При размораживании пищевых продуктов, замороженных в блоках, для промышленных целей по общепринятой ускоренной технологии нагревания за счет тепловой конвекции воздуха или подогреванием водой возможны загрязнения и порча продуктов.

Совершенствование техники размораживания связано с изменением методов обработки, необходимостью дальнейшей интенсификации процесса, созданием конструкций агрегатов непрерывного действия. При этом важнейшим условием должно быть максимальное сохранение исходного качества мяса.

Анализ существующих способов и опыт зарубежных фирм по использованию СВЧ-энергии для размораживания блоков мяса и других пищевых продуктов показали преимущества данного метода перед другими:

- экономия производственных площадей;
- точное регулирование конечной температуры внутри продукта;
- простота обслуживания установки;
- уменьшение трудовых затрат благодаря размораживанию пищевых продуктов в упаковке.

Оценка качества и санитарного состояния готовой продукции показала, что СВЧ-размораживание позволяет уменьшить потери белковых веществ и витаминов, предотвратить развитие микрофлоры, улучшить нежность мяса, что особенно важно при производстве из размороженного сырья вареных колбасных изделий. Отмечено также увеличение времени хранения и срока реализации пищевых продуктов из сырья, размороженного с помощью СВЧ-энергии.

Выбор способа размораживания и устройства для его осуществления определяется мощностью предприятия, его возможностями и видом обрабатываемого продукта.

6.9. Хранение пищевых продуктов у потребителя

При соблюдении всех требований к производству, хранению и транспортированию пищевая ценность продуктов, законсервированных с помощью холода, хорошо сохраняется, и такие продукты, пройдя все звенья холодильной цепи, попадают к потребителю в отличном состоянии. Дальнейшее состояние продукта, его качество зависят от того, в каких условиях он находится у потребителя.

При продаже в розничной сети термическое состояние продукта должно находиться на уровне, определяющем оптимальные условия хранения. Так, температура особо скоропортящихся продуктов должна быть не выше 6°C , а замороженных (предназначенных для хранения в домашних условиях) согласно рекомендациям МИХ – не выше -15°C . Такие продукты могут быть использованы не только для непосредственной кулинарной обработки, но и для хранения у потребителя в течение рекомендуемых сроков при определенных режимах и наличии соответствующей холодильной техники.

Во время доставки до места потребления такие продукты подвергаются воздействию окружающей среды, причем основное значение имеет температурный фактор.

Поэтому для доставки продуктов холодильной обработки потребителю целесообразно пользоваться специальными средствами транспортирования продукта. Диапазон таких средств в зарубежных супермаркетах, торгующих охлажденными и морожеными продуктами, достаточно разнообразен – от дешевых (одноразовых) термоизолированных бумажных сумок до термоизолированных пенополиуретановых контейнеров и потребительских контейнеров с термоэлектрическим охлаждением различного назначения и объема.

При отсутствии таких средств время доставки продуктов должно быть максимально сокращено, а сами продукты должны быть завернуты в несколько слоев упаковки и помещены в центре, среди других покупок, так как даже незначительные изменения температурного режима резко ограничивают потенциальный срок хранения их у потребителя.

При хранении продуктов в бытовом домашнем холодильнике основное внимание следует уделять их рациональному размещению. Решение этого вопроса упрощается при наличии современного суперхолодильника, имеющего несколько камер (зон) хранения продуктов с управлением микропроцессором.

При использовании одно-, двухкамерных холодильников устаревших конструкций необходимо соблюдать некоторые правила, позволяющие не только сохранить качество продуктов, но и снизить энергопотребление холодильного агрегата.

Рациональное размещение продуктов в холодильнике позволяет увеличить его емкость, уменьшить усушку продуктов и предотвратить потерю их качества. Для этого подбирают специальную посуду (лотки, банки, коробки, пакеты и др.) наиболее удобной (квадратной и прямоугольной) формы, позволяющую расположить продукты максимально плотно. Желательно также, чтобы продукт занимал не менее 80% емкости посуды.

При хранении охлажденных продуктов необходимо рационально использовать весь диапазон температур, естественным путем формирующийся в камере холодильника. Так, градиент температур в работающем холодильнике может достигать 8...9⁰С. Минимальная температура (0...-2⁰С) создается непосредственно под низкотемпературным отделением, если оно расположено в верхней части холодильника, или над ним, если расположено в нижней части, а также рядом с испарителем. В части, наиболее удаленной от низко температурного отделения, температура может достигать 6...7⁰С. Это позволяет наиболее рационально размещать продукты, обеспечив благоприятные условия для их хранения. Так, охлажденное мясо, птицу, рыбу для кратковременного хранения желательно размещать ближе к низкотемпературному отделению. Там же хорошо сохраняются сыры, сливочное масло и большинство жиров. Фрукты и овощи, напротив, рекомендуется хранить в изолированных емкостях, установленных подальше от низкотемпературного отделения. Заполняя емкости плодово-овощной продукцией, необходимо сгруппировать ее по видам (овощи, фрукты, ягоды, зелень), так как режимы хранения их различны. Соления и маринады достаточно хорошо сохраняются рядом с овощами. Там же в течение непродолжительного времени (от нескольких часов до 1...2 суток) можно хранить и кулинарно обработанные блюда текущего потребления. На внутренней стороне дверцы холодильника имеются, как правило, специальные формы и отделения для хранения отдельных продуктов (молоко, яйца, напитки и др.).

С целью соблюдения принципа товарного соседства продукты, имеющие острые, специфические запахи (рыба, сыр, копчености и др.), а также легко их воспринимающие (сливочное масло, творог, сметана, кремы и др.) следует хранить в герметичной посуде или упаковке. Применение такой упаковки с целью снижения их усушки предпочтительно для всех продуктов.

Замороженные продукты хранят в низкотемпературном отделении (-18⁰С и ниже) упакованными в соответствующую герметичную упаковку во избежание излишнего обезвоживания в процессе хранения. Непродолжительное время замороженные продукты можно хранить в низкотемпературном отделении при температуре не выше -12⁰С.

Все замороженные продукты необходимо хранить с учетом порционности их потребления, так как срок хранения размороженных и повторно замороженных продуктов сокращается в несколько раз.

Рекомендуемые сроки хранения мясопродуктов при температуре в холодильной камере 4⁰С:

- мясо охлажденное любой жирности (говяжье, свиное, птицы), полуфабрикаты, печень, почки – до 24 ч;
- мясной фарш – до 8 ч;
- мясные изделия и блюда готовые, термообработанные – до 48 ч.

В морозильном отделении при температуре не выше -18⁰С мясо и мясопродукты (говядина, баранина) можно хранить:

- нежирное мясо крупными кусками (по 0,5...1 кг) – до 10 мес. мелкими кусками – до 7, в виде фарша, печень, почки – до 6 мес.;
- мясо и мясопродукты натуральные из свинины: крупные куски – до 5 мес.; мелкие – до 4, фарш, котлеты – до 3 мес.;
- мясо птицы нежирное – до 6 мес., жирное – до 4 мес.

Свежую рыбу и другие морепродукты разрешается хранить в холодильнике не более суток при обязательной тепловой кулинарной обработке перед употреблением.

Рыбу и морепродукты в замороженном виде при температуре -18⁰С можно хранить в течение 4 мес. – нежирную продукцию и 2 мес. – жирную.

Соленая и маринованная рыба в герметично укупоренной таре может храниться при 0...4⁰С в течение 4 мес., а рыба горячего копчения при таком же режиме – не более 2 сут.

Молоко и молочные продукты следует хранить в соответствии с рекомендациями на их упаковке.

Срок хранения сливочного масла при 0...4⁰С и текущем его потреблении – 15...20 дней. Особого внимания требует хранение сыра, так как при повышенной влажности без упаковки он на четвертые – пятые сутки может заплесневеть, а в бумажной упаковке быстро сохнет.

Яйца в домашнем холодильнике хранят при температуре от 0 до 6⁰С в течение 15...20 сут, периодически осматривая их и отмечая дефекты, пороки, повреждения.

Быстрозамороженную плодоовощную продукцию в низкотемпературном отделении при -18⁰С можно хранить от нескольких месяцев до года в зависимости от ее вида.

При хранении охлажденной плодоовощной продукции следует придерживаться следующих правил (см. табл. 2).

Таблица 2 – Хранение охлажденных плодов и овощей в бытовом холодильнике

Продукт	Рекомендуемая температура хранения, ⁰ С	Продолжительность хранения, недели
Апельсины	5...10	6...12
Баклажаны	7...10	10 дней
Перец сладкий	7	2...3
Огурцы	7...10	2...3
Томаты красные	7...10	1...2

ка	Абрикосы	-0,5	2
	Черника, голубика	-0,5	3...6
	Вишня, черешня	1	2...4
	Виноград	-1	4...12
	Сливы	0,5	2...7
	Малина	0	3...5 дней
	Клубника	0	1...5 дней
	Капуста	0	4...12
	Морковь	0	12...20

Рекомендуемые режимы и сроки хранения рассчитаны на то, что размещаемые на хранение в бытовой холодильник продукты имеют высокое качество.

Контрольные вопросы

1. Перечислите методы консервирования.
2. Перечислите методы сохранения пищевых продуктов.
3. Перечислите виды холодильной обработки пищевых продуктов.
4. Что понимают под режимом холодильной обработки и хранения?
5. Какие вспомогательные средства применяют при холодильной обработке и хранении?
6. Перечислите способы охлаждения пищевых продуктов.
7. Какие факторы влияют на скорость охлаждения?
8. Каковы цели замораживания?
9. Перечислите признаки, отличающие замороженный продукт от охлажденного.
10. Как подразделяются виды замораживания?
11. Какие существуют основные способы подмораживания?
12. Какие теплофизические свойства пищевых продуктов изменяются при замораживании и как?
13. Как осуществляется отепление охлажденных продуктов?
14. От чего зависит продолжительность отепления?
15. Как классифицируются методы размораживания?

7. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЕНТИЛЯЦИИ

7.1. Общие понятия о вентиляции

7.1.1. Воздухообмен в помещениях

Избыточное тепло, влага, газы и пыль ухудшают гигиеническое состояние воздуха производственных и жилых помещений. Организуя воздухообмен в помещении при помощи вентиляции, поддерживают параметры воздуха на уровне требований санитарно-гигиенических норм и особенностей технологического процесса.

По способу воздухообмена различают вентиляцию естественную и искусственную (механическую).

Вентиляцию, при которой воздух перемещается в результате разности плотностей воздуха внутри и снаружи помещения, а также вследствие действия ветра, называют *естественной*.

Вентиляцию, при которой воздух перемещается при помощи вентилятора, называют *искусственной* или *механической*.

Вентиляция по организации воздухообмена в помещении может быть *общей, местной* и *смешанной*. Общая вентиляция поддерживает нормальные гигиенические условия воздушной среды во всем помещении, местная - только на отдельных рабочих местах.

7.1.2. Естественная вентиляция

Различают *неорганизованную (инфильтрация)* и *организованную (аэрация)* естественную вентиляцию. При инфильтрации загрязненный (отработанный) воздух удаляется через щели, неплотности в строительных ограждениях, поры стен, открытые окна и двери. Величину этого воздухообмена расчетом определить нельзя: воздухообмен не регулируется и зависит от разности температур внутреннего и наружного воздуха, скорости ветра, величины щелей, материала ограждений, а также площади открываемых форточек, окон и дверей.

При аэрации воздухообмен в помещениях происходит через специальные створки фрамуг, каналы, вытяжные трубы и насадки. Эти отверстия располагаются с наветренной и подветренной сторонах здания на различной высоте.

В теплое время года открывают нижние отверстия на высоте 0,3...1,2 м от пола, а в холодное время года - верхние отверстия на высоте не ниже 4 м от пола, чтобы холодный воздух успел подогреться, прежде чем достигнет рабочих мест.

Аэрация получила широкое распространение на промышленных предприятиях.

7.1.3. Механическая вентиляция

Наиболее эффективна местная вытяжная вентиляция, при которой пыль удаляют, отсасывая воздух из технологического оборудования. Местная при-

точная вентиляция позволяет создавать необходимые условия в ограниченных участках цеха.

Например, на хлебоприемных предприятиях и заводах по переработке зерна применяют в основном всасывающие вентиляционные установки, которые обеспыливают оборудование при помощи местных отсосов запыленного воздуха. При отсосе воздуха в кожухах машин создается вакуум, который препятствует выделению пыли в помещение. Всасывающие вентиляционные установки называют *аспирационными*.

Объем приточного (вводимого) воздуха $Q_{\text{вв}}$ (м³/ч) определяют в зависимости от величины избытка теплоты, плотности, теплоемкости и температуры удаляемого и вводимого воздуха:

$$Q_{\text{вв}} = \frac{E}{\rho_{\text{вв}} c(t_{\text{уд}} - t_{\text{вв}})}, \quad (7.1)$$

где E - избыток теплоты, кДж/ч; $\rho_{\text{вв}}$ - плотность вводимого воздуха, кг/м³; c - удельная теплоемкость воздуха, кДж/(кг·К); $t_{\text{уд}}$ и $t_{\text{вв}}$ - температуры удаляемого и вводимого воздуха, °С.

Объем вводимого воздуха может быть определен также в зависимости от величины поперечного сечения проемов и скорости воздуха в проемах:

$$Q_{\text{вв}} = 3600Fw\mu, \quad (7.2)$$

где F - площадь сечения проемов, м²; w - скорость воздуха в проеме, м/с; μ - коэффициент расхода, при полностью открытых створках $\mu = 0,65$, при створках, открытых на угол 45° $\mu = 0,44$, и на угол 30° $\mu = 0,32$.

В качестве движущей силы выступает разность давлений наружного и внутреннего воздуха:

$$\Delta p = gh(\rho_{\text{вв}} - \rho_{\text{вн}}), \quad (7.3)$$

где h - высота между серединами нижних и верхних отверстий, м; $\rho_{\text{вв}}$ - плотность вводимого воздуха, кг/м³; $\rho_{\text{вн}}$ - плотность воздуха внутри помещения, кг/м³; g - ускорение силы тяжести, м/с².

С другой стороны, давление в проеме можно выразить как давление в местном сопротивлении с коэффициентом сопротивления $\xi = 1$ и тогда скорость воздуха в проеме можно определить по выражению:

$$w = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}. \quad (7.4)$$

Площадь сечения проемов определяется из выражения (6.2):

$$F = \frac{Q_{\text{вв}}}{3600w\mu}. \quad (7.5)$$

7.1.4. Принципиальные схемы вентиляционных установок

Вентиляционная сеть называется *местной*, если вентилятор сети обслуживает одну обеспыливаемую точку (машину), и *центральной*, если обслуживается несколько точек.

В зависимости от способа подачи воздуха в пылеотделитель различают **нагнетательные** и **всасывающие** вентиляционные установки.

Нагнетательной называют вентиляционную сеть, в которой запыленный воздух нагнетается вентилятором в пылеотделитель. В этом случае воздух движется в такой последовательности: обеспыливаемая машина - воздухопровод - вентилятор - воздухопровод - пылеотделитель. В нагнетающей сети через вентилятор проходит запыленный воздух.

Всасывающей называют вентиляционную сеть, в которой запыленный воздух всасывается вентилятором через пылеотделитель. Последовательность движения воздуха во всасывающей сети: обеспыливаемая машина - воздухопровод - пылеотделитель - воздухопровод - вентилятор. Во всасывающей сети через вентилятор проходит очищенный воздух.

Вентиляционные сети в зависимости от характера запыленности, условий обеспыливания, технологических требований, а также обеспечения «климата» помещений могут осуществлять одноступенчатую или двухступенчатую очистку воздуха с частичной рециркуляцией. В практике встречаются установки с замкнутым циклом.

В местных нагнетающих сетях вентилятор устанавливают как отдельно от машины, так и внутри ее.

В центральной нагнетающей сети вентилятор устанавливается всегда отдельно.

Во всех схемах очищенный воздух выбрасывается из пылеотделителя в атмосферу или возвращается в помещение. Однако одно условие обязательно для обоих случаев: количество пыли, содержащееся в воздухе, не должно быть больше предельно допустимой концентрации по нормам. В зависимости от этого условия выбирают схему, в которой воздух одно- или двукратно пропускают через пылеотделитель.

Всасывающие вентиляционные сети – местные и центральные – чаще всего применяют в размольном отделении мукомольного завода или в шелушильном отделении крупозавода.

Запыленный воздух отсасывается из оборудования, и после очистки выбрасывается наружу. Взамен отсасываемого воздуха в помещение поступает наружный воздух. Чтобы в зимнее время наружный воздух не нарушал тепловой баланс помещения, его подогревают.

Экономически выгоднее применять рециркуляцию очищенного воздуха.

7.2. Воздух и его свойства

Состав воздуха. Атмосферный воздух представляет собой смесь различных газов, водяных паров и механических примесей – пыли. Приблизительный состав атмосферы воздуха:

	По объему, %	По массе, %
Кислород, O ₂	20,90	23,10
Азот, N ₂	78,13	75,55

Аргон, Ar	0,94	1,30
Углекислота, CO ₂	0,03	0,05

7.2.1. Основные параметры воздуха

Атмосферный воздух никогда не бывает абсолютно сухим. В его составе всегда присутствует некоторое количество водяного пара, поэтому такой воздух называют влажным.

Водяной пар содержится обычно в атмосферном воздухе в ненасыщенном (перегретом) состоянии, но может переходить и в насыщенное состояние.

Состояние влажного воздуха определяется давлением, температурой, плотностью, удельным объемом, влажностью и энтальпией.

Давление.

Единицы измерения давления:

Техническая атмосфера: ат (кгс/см²)

1 ат = 735 мм рт.ст. = 98100 Па.

Физическая атмосфера: 1 атм = 760 мм рт.ст. = 101366 Па

1 мм рт.ст. = 133,322 Па.

Так как влажный воздух – механическая смесь сухого воздуха и водяного пара, то давление влажного воздуха на основании закона Дальтона представляет собой сумму парциальных давлений сухого воздуха и содержащегося в нем водяного пара:

$$p_{в.в.} = p_{с.в.} + p_{п}, \quad (7.6)$$

где $p_{в.в.}$ – давление влажного воздуха, определяемое по барометру; $p_{п}$ – парциальное давление водяного пара; $p_{с.в.}$ – парциальное давление сухого воздуха;

Удельный объем:

$$v_0 = \frac{1}{\rho},$$

где ρ - плотность.

Уравнение состояния воздуха:

Уравнение Менделеева-Клапейрона $\frac{p}{\rho} = RT \quad (7.7)$

для сухого воздуха $R_{с.в.} = 287$ Дж/(кг · К);

для водяного пара $R_{п} = 461$ Дж/(кг · К) (от 0⁰ до 100⁰С);

$$\text{для влажного воздуха } R_{в.в.} = \frac{287}{1 - 0,378\varphi \frac{p_{п}}{p_{в.в.}}} = \frac{8310}{28,96 - 10,944\varphi \frac{p_{п}}{p_{в.в.}}},$$

где φ – относительная влажность воздуха, $p_{п}$ – давление насыщенного водяного пара при данной температуре, 8310 Дж/(кмоль · К) – универсальная газовая постоянная.

Понятие о стандартном воздухе. Это воздух, плотность которого определяют при $t = 20^{\circ}\text{C}$, $\varphi = 50\%$ и $p_{в.в} = 760$ мм.рт.ст. (101366 Па).

Из (6.7) можно получить плотность стандартного воздуха $\rho_{ст} = 1,2$ кг/м³ (при $t = 20^{\circ}\text{C}$ $p_{н} = 2380$ Па).

Влажность воздуха.

Абсолютной влажностью воздуха называют массу водяного пара, содержащегося в 1 м³ влажного воздуха при данной температуре и давлении. То есть абсолютная влажность равна плотности водяного пара $\rho_{п}$.

Если при данных температуре и абсолютной влажности продолжать вводить пары, то воздух будет насыщаться до определенного предела, выше которого водяной пар не будет усваиваться воздухом.

Абсолютную влажность воздуха при полном его насыщении водяными парами при данной температуре называют **влажностью** воздуха $\rho_{н}$. По сути $\rho_{н}$ – плотность насыщенного водяного пара.

Из формулы (7.7) влажность равна $\rho_{п} \approx \frac{p_{п}}{R_{п}T}$.

Относительной влажностью φ называют отношение абсолютной влажности к влажности воздуха при данных температуре и давлении. Или (другими словами) отношение фактического количества водяных паров в 1 м³ воздуха к максимально возможному при тех же температуре и давлении:

$$\varphi = \frac{\rho_{п}}{\rho_{н}}; \quad \varphi = \frac{p_{п}}{p_{н}} \cdot 100\% \quad (7.8)$$

Используя уравнение состояния, можно получить:

$$\varphi = \frac{\rho_{п}}{\rho_{н}} \cong \frac{p_{п}}{p_{н}}, \quad (7.9)$$

т.е. парциальное давление водяного пара в воздухе:

$$p_{п} \cong \varphi \cdot p_{н} \quad (7.10)$$

Влажностное содержание воздуха d.

Это масса водяных паров, приходящаяся на 1 кг сухого воздуха. Влажностное содержание выражают в г на 1 кг сухого воздуха или в кг на 1 кг сухого воздуха.

Связь влажностного содержания и относительной влажности можно получить из уравнения состояния:

$$d = 622 \frac{\varphi p_{н}}{p_{в.в} - \varphi p_{н}} \left(\frac{\text{г. вод. паров}}{\text{кг. сух. воздуха}} \right)$$

или $d = 0,622 \frac{\varphi p_{н}}{p_{в.в} - \varphi p_{н}} \left(\frac{\text{кг. в. п.}}{\text{кг. сух. в.}} \right) \quad (7.11)$

Энтальпия влажного воздуха.

Энтальпию принято относить к некоторому количеству влажного воздуха (1+d), масса сухой части которого 1 кг. Количество тепла, содержащегося в 1 кг

сухого воздуха, называют удельной энтальпией или удельным теплосодержанием сухого воздуха (кДж/кг).

Энтальпия влажного воздуха складывается из энтальпий сухого воздуха и водяного пара:

$$\begin{aligned} i_{в.в} &= i_{с.в} + i_{п} \cdot d & (7.12) \\ i_{с.в} &= c_{с.в} \cdot t; \\ i_{п} &= (r + c_{п} t), \end{aligned}$$

где r – теплота парообразования;

$c_{п}$ – теплоемкость водяного пара.

$$\text{Тогда: } i_{в.в} = i_{с.в} + i_{п} = c_{с.в} \cdot t + (r + c_{п} t) \cdot d. \quad (7.13)$$

id - диаграмма влажного воздуха (диаграмма Рамзина рисунок 6.1).

Диаграмма представляет собой графическую зависимость между основными параметрами воздуха t , φ , d , i .

На id - диаграмме изображены линии, соответствующие:

- постоянной температуре $t = \text{const}$ – изотермы;
- постоянной относительной влажности $\varphi = \text{const}$;
- постоянному удельному влагосодержанию $d = \text{const}$;
- постоянной энтальпии $i = \text{const}$, наклоненные под углом 45° к оси абсцисс.

Линии на диаграмме построены в определенном масштабе.

Любая точка на диаграмме, найденная по двум каким-либо данным, характеризует все четыре параметра влажного воздуха. При переходе воздуха из одного состояния в другое по диаграмме можно найти две точки, которые будут характеризовать все четыре параметра, соответствующие начальному и конечному состояниям воздуха.

Подогрев воздуха изображают на диаграмме вертикальной линией $d = \text{const}$, проведенной вверх из точки, характеризующей начальное состояние воздуха.

Охлаждение воздуха изображают вниз по вертикальной линии $d = \text{const}$, которая при пересечении с линией $\varphi = 100\%$ соответствует точке росы, а, следовательно, температуре, ниже которой наступает процесс конденсации влаги.

Зная начальные и конечные значения влагосодержания и энтальпии, можно определить количество влаги, вносимое или уносимое при увлажнении или сушке, а также количество тепла для нагрева или охлаждения воздуха.

Количество влаги:

$$G_{вл} = G_{с.в} \frac{(d_2 - d_1)}{1000} \quad (7.14)$$

где $G_{с.в}$ – количество сухого воздуха (кг);

d_1 и d_2 – начальное и конечное значения удельного влагосодержания, г/кг сух.возд.

Количество теплоты:

$$E = G_{c.v} (i_2 - i_1) \quad (7.15)$$

7.2.2. Основные понятия о воздушном потоке

Уравнение неразрывности струи

Установившимся движением называют такое движение, при котором в каждой данной точке потока скорость по направлению и величине, давление, плотность и другие величины неизменны во времени и могут изменяться только при переходе частицы жидкости или газа из одного положения в другое.

Для установившегося движения уравнение неразрывности имеет вид:

$$f_1 w_1 \rho_1 = f_2 w_2 \rho_2 = \dots = G = \text{const}, \quad (7.16)$$

где f – площадь поперечного сечения потока, м^2 ; w – средняя по сечению скорость потока, м/с ; ρ – плотность потока, кг/м^3 .

В вентиляционных установках без подогрева воздуха его плотность меняется очень незначительно (~ на 20%) по длине воздухопровода и поэтому уравнение неразрывности можно записать:

$$f_1 w_1 = f_2 w_2 = \dots = fw = \text{const} \quad (7.17)$$

В случае подогрева воздуха (например, в калорифере) плотность воздушного потока изменяется и это необходимо учитывать.

Из уравнения неразрывности следует:

$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{f_2}{f_1}.$$

В вентиляционных установках часто используют понятие объемного расхода (просто расхода), $\text{м}^3/\text{с}$, т.е. количество воздуха, протекающего через поперечное сечение трубы в единицу времени:

$$q = fw, \quad (7.18)$$

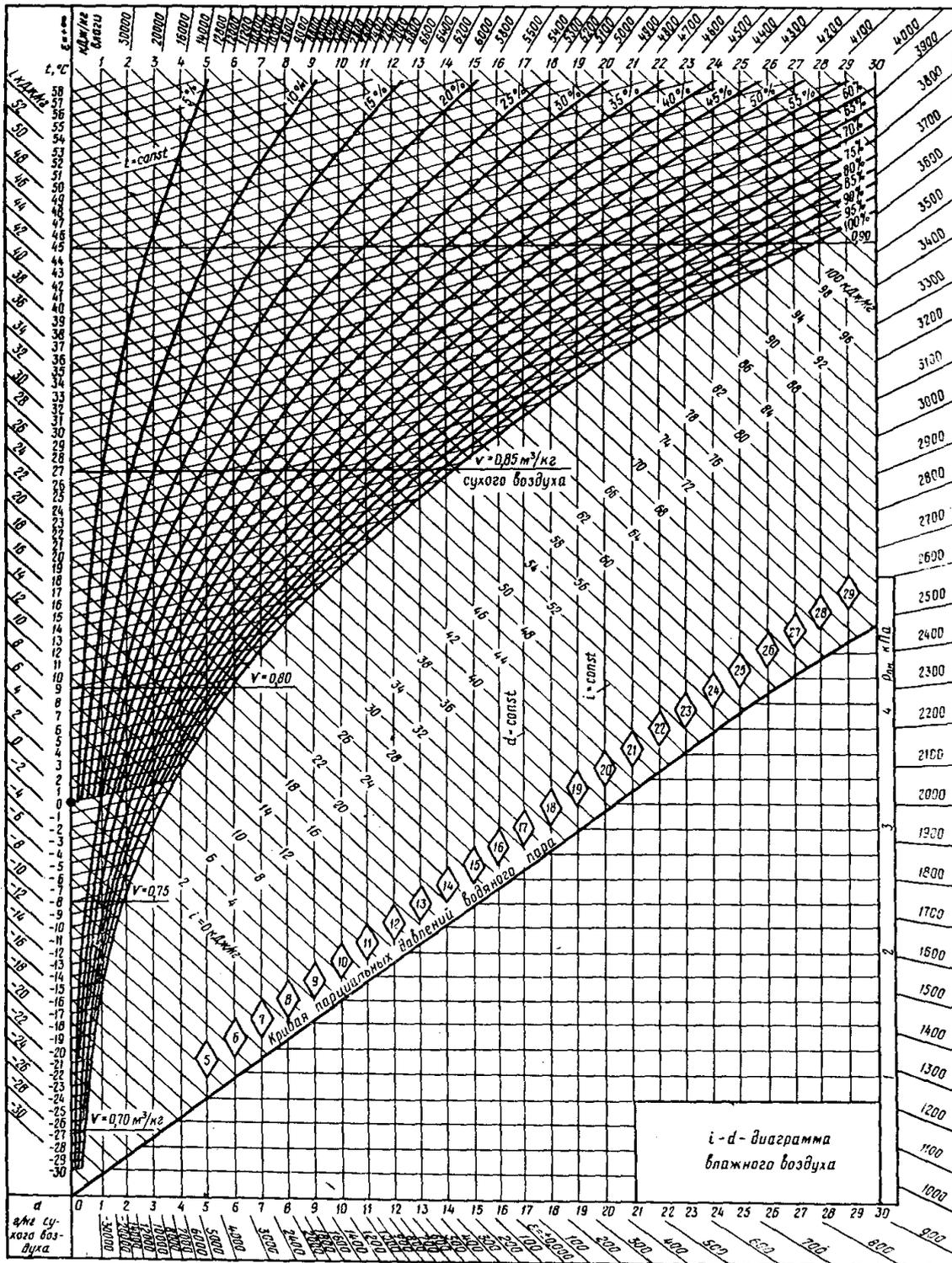


Рисунок 7.1 – $i-d$ – диаграмма для влажного воздуха ($p_{\text{общ}} = 100 \text{ кПа}$)

Для воздухопроводов круглого сечения:

$$f = \frac{\pi D^2}{4},$$

где D – диаметр трубы, м;

прямоугольного: $f = ab,$

где a – ширина воздухопровода, м; b – высота воздухопровода, м.

Тогда расход воздуха: $q = \frac{\pi D^2 w}{4}; \quad q = abw.$

Давление воздушного потока

Разность между давлением в трубе $p_{тр}$ и атмосферным давлением p_a называют избыточным давлением или напором (H):

$$H = p_{тр} - p_a \quad (7.19)$$

Избыточное давление может быть положительным (на нагнетании) и отрицательным (на всасывании).

Если в воздушный поток поместить тонкую пластинку так, чтобы ее стенки были параллельны направлению воздушного потока, то она практически не нарушит условий течения воздуха. Воздух давит на пластинку со всех сторон одинаково, т.е. будем иметь гидростатическое давление (или просто статическое). Этому же давлению подвергаются частицы воздуха и внутренние стенки воздухопровода.

Избыточное давление, действующее на стенки трубы $H_{ст} = p_{ст} - p_a$. $H_{ст}$ может быть как положительным, так и отрицательным.

Если перпендикулярно воздушному потоку поставить ту же пластину, то появится динамическое или скоростное давление:

$$H_{ск} = \frac{\rho w^2}{2}$$

Для стандартного воздуха $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$, тогда $H_{ск} = \frac{\rho w^2}{2} = \frac{1,2w^2}{2}$, следовательно, $w = \sqrt{\frac{2H_{ск}}{1,2}} = 1,29\sqrt{H_{ск}}$.

Общий или полный напор (давление) воздушного потока.

$$\pm H_0 = \pm H_{ст} + H_{ск} = \pm H_{ст} + \frac{\rho w^2}{2} \quad (7.20)$$

Уравнение Бернулли

Это уравнение представляет собой выражение закона сохранения энергии для потока воздуха:

$$E = h\rho g + p_{ст} + \frac{\rho w^2}{2}$$

где h – высота центра тяжести сечения струи относительно плоскости сравнения, м.

Для идеального воздухопровода для двух сечений уравнение Бернулли имеет вид:

$$p_{ст1} + \frac{\rho w_1^2}{2} = p_{ст2} + \frac{\rho w_2^2}{2} = \text{const.}$$

В реальном воздухопроводе воздушный поток преодолевает сопротивления, расходуя на это часть энергии, поэтому общая энергия потока постепенно уменьшается. Тогда

$$p_{01} = p_{02} + H_{пот},$$

где p_0 – полное давление, Па.

Представим уравнение в виде:

$$p_{ст1} + \frac{\rho w_1^2}{2} = p_{ст2} + \frac{\rho w_2^2}{2} + H_{пот}.$$

На практике чаще пользуются значениями не абсолютных, а избыточных давлений, тогда

$$H_{пот} = (\pm H_{ст1} + \frac{\rho w_1^2}{2}) - (\pm H_{ст2} + \frac{\rho w_2^2}{2}) \quad (7.21)$$

Если $f_1 = f_2$, то и $w_1 = w_2$ и уравнение примет вид:

$$H_{пот} = \pm H_{ст1} - (\pm H_{ст2}) \quad (7.22)$$

Контрольные вопросы

1. Дать определение естественной и принудительной вентиляции.
2. Как подразделяется естественная вентиляция?
3. Какие вентиляционные установки называются аспирационными?
4. Дать определение нагнетательной и всасывающей вентиляционным сетям.
5. Назовите состав воздуха.
6. Перечислите основные параметры воздуха.
7. В каких единицах измеряется давление в системе СИ, во внесистемных единицах?
8. Дать определение стандартному воздуху.
9. Дать определение абсолютной влажности воздуха.
10. Дать определение влагоемкости воздуха.
11. Дать определение относительной влажности воздуха.
12. Дать определение удельному влагосодержанию воздуха.
13. Какие параметры отображены на диаграмме Рамзина?
14. Напишите уравнение неразрывности струи.
15. Напишите уравнение Бернулли.

7.3. Пыль и пылевоздушные смеси

Классификация и характеристика пыли

Степень раздробленности вещества (твердого, жидкого или газообразного) характеризуется величиной его дисперсности.

Пылью называют совокупность тонкодисперсных частиц твердого вещества, которые могут находиться как во взвешенном состоянии в воздухе – аэрозоль, так и в виде пылевого налета на любой поверхности – аэрогель.

Запыленный воздух представляет собой дисперсную систему. Она состоит из распределенной в окружающей газообразной среде твердой дисперсной фазы.

Возможен переход пыли из одного состояния в другое. Из аэрозольного в аэрогельное состояние пыль может переходить под влиянием различных сил (тяжести, центробежных или электрических). Переход пыли из аэрогельного в аэрозольное состояние происходит под действием сил, вызванных ударами, вибрацией, потоками воздуха.

Аэрозоли подразделяются на два вида: с твердой дисперсной фазой (пыль и дым) и жидкой дисперсной фазой (туман).

Свойства пылевидных частиц вещества отличаются от свойств исходного нераздробленного вещества. Эти отличия в основном связаны с большим увеличением суммарной поверхности раздробленного вещества.

Частицы пыли приобретают такие новые свойства:

- повышенную химическую активность при горении;
- способность накапливать и переносить большие электростатические заряды на поверхности оборудования и конструкции зданий;
- адсорбировать в большом количестве газы и водяные пары.

По происхождению пыль подразделяют на органическую, неорганическую и смешанную. К органической относят пыль материалов растительного происхождения – древесную, хлопковую, мучную, сахарную; к неорганической – пыль металлов – чугунную, стальную, медную и т.д., а также минеральную – кварцевую, асбестовую, фарфоровую, цементную, наждачную и т.п.

Пыль в зависимости от происхождения и способа образования различают по величине частиц (дисперсности), плотности, форме частиц, воспламеняемости, способности адсорбировать различные вещества и др.

Важнейшая физико-техническая характеристика пыли – дисперсность. Промышленная пыль в большинстве случаев полидисперсная, т.е. состоит из частиц неправильной формы и с различными размерами поперечных сечений.

По размерам пыль условно подразделяют на крупную (50...250 мкм), среднюю (10...50 мкм) и мелкую (< 10 мкм).

Дисперсность пыли обратно пропорциональна размерам ее частиц. Степень дисперсности пыли тем меньше, чем больше суммарная поверхность частиц раздробленного вещества.

Другой характеристикой дисперсности пыли может служить скорость оседания частиц, зависящая от величины частиц, формы поперечного сечения и плотности. Крупные частицы оседают с относительно большей скоростью.

Пыль вредна для организма человека. Степень ее влияния зависит от размеров и химического состава частиц. Самая опасная – мелкая пыль из частиц размером менее 5 мкм. Опасность пыли по химическому составу оценивают содержанием кремнезема (SiO_2).

Различают пыль ядовитую (свинцовую, ртутную, мышьяковую, известковую) и неядовитую (органическую, металлическую и пыль от различных минеральных веществ). В зерновой и мучной пыли находится большое количество различных микроорганизмов, попадают споры различных грибов.

Согласно санитарным нормам, для рабочих зон производственных помещений (на высоте до 2 метров над уровнем пола или площадки, где работают люди) предельно-допустимые концентрации (ПДК) органической и неорганической пыли составляют:

- при содержании в ней более 10% SiO_2 – 2 мг/м³;
- при содержании от 2 до 10% SiO_2 – 4 мг/м³;
- при содержании менее 2% SiO_2 – 6 мг/м³.

Эти же нормы определяют значение предельно допустимой концентрации нетоксичной пыли в атмосферном воздухе населенных мест:

- максимальная разовая – 0,5 мг/м³;
- средняя суточная – 0,15 мг/м³.

Величина запыленности воздуха, выбрасываемого в атмосферу из вентиляционных сетей трубами, дефлекторами и т.д. не более 0,5 мг/м³.

По взрывоопасности пыль подразделяют на три класса. Мучную пыль относят к 1 классу, как легковоспламеняющуюся с быстрым распространением пламени взрыва. Для ее воспламенения достаточно тепла зажженной спички. Зерновая пыль тоже легко воспламеняется, но требует источника тепла больших размеров с более высокой температурой. Взрыв пыли возможен при наличии источника воспламенения и определенной концентрации пыли в воздухе. Источником высокой температуры наряду с прочими могут быть и разряды статического электричества. Нижний предел взрывоопасной концентрации для элеваторной пыли от 40 до 90 г/м³; для мельничной (мучной) – от 10 до 50 г/м³; для комбикормовой – от 7,6 до 25 г/м³.

8. ВЕНТИЛЯЦИОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

8.1. Пылеотделители

8.1.1. Способы очистки воздуха от пыли

Основные способы:

- осаждение пыли под действием силы тяжести в пылесадочной камере (гравитационные пылеотделители);
- отделение пыли под действием сил инерции в центробежных пылеотделителях (циклонах) или жалюзийно-инерционных пылеотделителях и эжекторных пылеконцентраторах;
- отделение пыли фильтрацией запыленного воздуха в фильтрах различных конструкций (матерчатые рукавные фильтры, гравийные или щебеночные фильтры);

- отделение пыли под влиянием сил сцепления и прилипания, действующих между частицами пыли и поверхностями пылеотделителя (сухие и жидкостные контактно-поверхностные пылеотделители);

- отделение высокодисперсной пыли электрическим способом (зарядка частиц пыли в электрическом поле коронного разряда или использование статических зарядов, приобретенных пылью при трении в момент ее движения).

Способ отделения пыли и тип пылеотделителя выбирают в зависимости от состава пыли и ее концентрации в воздухе, физико-технических свойств пыли, необходимой степени очистки, сложности конструкции пылеотделителя и его сопротивления.

8.1.2. Определение эффективности работы пылеотделителя

Работа пылеотделителей характеризуется величиной общего коэффициента очистки воздуха:

$$\eta_0 = \frac{a_1 - a_2}{a_1} \cdot 100\%, \quad (8.1)$$

где a_1 и a_2 – концентрация пыли в воздухе до и после очистки, г/м^3 или мг/м^3 .

Общий коэффициент очистки воздуха при двукратной очистке:

$$\eta_0 = \eta_1 + \eta_2 - \eta_1 \cdot \eta_2, \quad (8.2)$$

где η_1 и η_2 – коэффициенты 1-й и 2-й очистки.

При выделении фракций пыли на отдельных ступенях очистки общий коэффициент:

$$\eta_0 = \frac{\eta_1 \varphi_1}{100} + \frac{\eta_2 \varphi_2}{100} + \dots + \frac{\eta_n \varphi_n}{100},$$

где $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$ – коэффициенты очистки фракций;

$\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ – содержание фракций, %.

Для более точного сравнения эффективности очистки двух пылеотделителей пользуются величиной относительной остаточной запыленности воздуха в %:

$$\eta_{\text{ост}} = 100 - \eta_0 \quad (8.3)$$

Например, у первого пылеотделителя $\eta'_0 = 97\%$, у второго – $\eta''_0 = 98,5\%$. Нельзя считать, что эффективность второго пылеотделителя выше первого на $98,5 - 97 = 1,5\%$. Считают так: у первого пылеотделителя остаточная запыленность $\eta'_{\text{ост}} = 100 - 97 = 3\%$, у второго $\eta''_{\text{ост}} = 100 - 98,5 = 1,5\%$.

$$\frac{\eta'_{\text{ост}}}{\eta''_{\text{ост}}} = \frac{3}{1,5} = 2$$

Таким образом, степень загрязненности воздуха после второго пылеотделителя в два раза меньше, чем после первого.

Отделение пыли в циклонах происходит под действием центробежной силы, а эффект пылеотделения пропорционален величине центробежной силы, действующей на частицу пыли в потоке запыленного воздуха:

$$C = m\omega^2 r = \frac{mw^2}{r}, \quad (8.4)$$

где m – масса частицы, кг;

ω – угловая скорость, рад/с;

r – радиус вращения частицы, м;

w – окружная скорость, м/с.

Из этой формулы следует, что при данной массе частицы эффективность очистки зависит от скорости движения воздуха и радиуса циклона.

Превышение оптимального значения скорости $w_{вх}$ для данного типа циклона уменьшает его эффективность, т.к. при этом усиливается отрицательное действие вихревых течений и вынос под их действием частиц через выхлопную трубу в атмосферу.

Работа пылеотделителей характеризуется не только коэффициентом пылеотделения, но и величиной аэродинамического сопротивления H (Па), пропускной способностью пылеотделителя Q ($m^3/ч$), его стоимостью, эксплуатационной надежностью и безопасностью, габаритами.

8.1.3. Циклоны

Циклоны – наиболее распространенные пылеотделители для сухой очистки больших объемов воздуха от пыли. Они просты по конструкции, надежны и экономичны в эксплуатации, не требуют привода. Коэффициент очистки обычных циклонов находится в пределах 97-98%, а улучшенных конструкций на отдельных видах пыли – в пределах 99%. Однако на тонкодисперсной и легкой пыли эффективность их работы резко снижается.

Применяемые циклоны отличаются следующим:

- способом ввода воздуха (винтовой или плоский тангенциальный, плоский спиральный, спирально-винтовой);
- направлением вращения воздушного потока (правые – вращение потока воздуха по часовой стрелке; левые – вращение потока против часовой стрелки, если смотреть на циклон сверху);
- формой (цилиндрические, если $h_{ц} > h_{к}$, конусные, когда $h_{ц} < h_{к}$); $h_{ц}$ – высота цилиндрической части циклона, $h_{к}$ – конической части;
- высотой (большевысотные, когда $h_0/D_H > 2$; маловысотные, когда $h_0/D_H \leq 2$); h_0 – общая высота, D – наружный диаметр;

- числом циклонов в принятой установке (одиночные и групповые в виде совокупности сопряженных циклонов).

При работе циклона всегда присутствует подсос воздуха через выхлопную трубу. Он вызывается главным образом вращением потока и наличием в центральной части у оси конуса циклона области разрежения. Для снижения подсоса воздуха коническую часть циклона соединяют с устройством для герметизации выпуска.

8.1.4. Порядок подбора циклона и определение его сопротивления

Циклон подбирают по суммарному количеству воздуха Q_c ($m^3/ч$), поступающего в циклон из вентиляционной сети:

$$Q_c = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n, \quad (8.5)$$

где Q_1, Q_2, \dots, Q_n – количество воздуха, отсасываемого от каждой машины, включенной в сеть.

Это количество определяют в соответствии с нормами расхода воздуха на обеспыливание машин и механизмов.

Сопротивление циклона любой конструкции определяют так же, как и для любого местного сопротивления:

$$H_{\text{ц}} = \xi \frac{\rho w_{\text{вх}}^2}{2}, \quad (8.6)$$

где ξ – коэффициент местного сопротивления циклона;

$\frac{\rho w_{\text{вх}}^2}{2}$ – скоростное давление, Па;

$w_{\text{вх}}$ – входная скорость воздушного потока в циклон, м/с.

Таблица 8.1 – **Характеристики циклонов**

Циклоны	Коэффициент местного сопротивления	Скорость воздушного потока на входе в циклон, м/с
ЦОЛ	4	16...18
4БЦШ	5	13...16
УЦ-38	20D	10...12

Здесь D – внутренний диаметр цилиндрической части циклона.

Порядок подбора:

1. По расходу воздуха Q и рекомендуемой скорости входа воздушного потока в циклон определяют площадь входного отверстия (m^2):

$$F_{\text{вх}} = \frac{Q}{3600w_{\text{вх}}}.$$

2. По $F_{\text{вх}}$ подбирают циклон, у которого площадь входного отверстия $F'_{\text{вх}}$ близка к расчетной.

3. По расходу воздуха Q и площади сечения входа $F'_{\text{вх}}$ определяют действительную скорость входа воздушного потока в циклон $w'_{\text{вх}}$ (м/с).

$$w'_{\text{вх}} = \frac{Q}{3600F'_{\text{вх}}}.$$

4. Сопротивление циклона определяют по (7.6) в зависимости от $w'_{\text{вх}}$.

8.1.5. Инерционные пылеотделители

Инерционный жалюзийный пылеотделитель

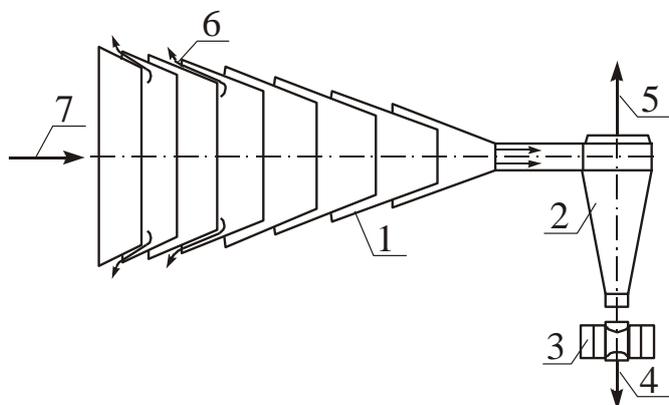


Рисунок 8.1 – Инерционный жалюзийный пылеотделитель:

1 – пылеотделитель; 2 – циклон; 3 – шлюзовый затвор; 4 – пыль; 5, 6 – очищенный воздух; 7 – запыленный воздух.

Он состоит из конических колец с постепенно уменьшающимся диаметром основания. Угол конусности колец 60° . Кольца установлены по одной оси на равном расстоянии друг от друга с шагом 12...16 мм.

Воздух вводится через отверстие в основании конуса, а выходит через зазоры между кольцами (примерно 92...95% воздуха, поступающего в пылеотделитель). Пыль от воздуха отделяется под действием силы инерции, возникающей при резком изменении направления движения запыленного воздуха. Частицы пыли ударяются о наклонные поверхности конических колец и, отражаясь, движутся к оси пылеотделителя, где их подхватывает воздушный поток (5...8% общего количества), перемещает к отверстию в вершине пылеотделителя и далее в циклон. Пыль отделяется в инерционном пылеотделителе, а улавливается в циклоне. Т.к. объем воздуха, очищаемого в циклоне, составляет всего 5...8% объема воздуха, поступающего в инерционный пылеотделитель, поэтому размеры циклонов небольшие.

Эжекторный пылеконцентратор

Принцип его работы тот же, что и у инерционного пылеотделителя. Только в эжекторном пылеконцентраторе под действием сил инерции происходит двухступенчатое отражение пылевых частиц, а в инерционном – одноступенчатое. Схема включения в вентиляционную сеть эжекторного пылеконцентратора такая же, как и инерционного, т.е. их можно включать как во всасывающую, так и в нагнетательную сеть. Жалюзийный инерционный и эжекторный пылеотделители эффективны, компактны, малогабаритны. У них перед другими пылеотделителями ряд преимуществ:

- непрерывный вывод материала и стабильность сопротивления;
- не требуют производственных площадей, т.к. устанавливают их непосредственно в аспирационных воздухопроводах.

Инерционный пылеотделитель имеет коэффициент очистки воздуха 97,8% при аэродинамическом сопротивлении 860 Па и входной скорости $w = 17 \dots 19$ м/с.

Эжекторный – 98,7% при $H = 460$ Па и $w = 11 \dots 13$ м/с.

8.1.6. Очистка газов в электрическом поле

Осаждение дисперсных твердых и жидких частиц в электрическом поле (электроосаждение) позволяет эффективно очистить газ от очень мелких частиц. Оно основано на ионизации молекул газа электрическим разрядом. Если газ, содержащий свободные заряды (электроны и ионы), поместить между двумя электродами, создающими постоянное электрическое поле, то свободные заряды начнут двигаться по силовым линиям поля. Скорость движения и кинетическая энергия будут определяться напряженностью электрического поля. При повышении разности потенциалов до нескольких десятков киловольт кинетическая энергия ионов и электронов становится достаточной для того, чтобы они сталкивались с нейтральными газовыми молекулами, расщепляли их на ионы и свободные электроны. Вновь образовавшиеся заряды при своем движении также ионизируют газ. В результате образование ионов происходит лавинообразно, газ полностью ионизируется. Такую ионизацию называют *ударной*. При этом возникают условия для электрического разряда. При дальнейшем увеличении напряженности электрического поля возможны электрический пробой и короткое замыкание электродов. Чтобы избежать этого, создают неоднородное электрическое поле: один электрод делают в виде проволоки, а другой - в виде охватывающей ее трубы или расположенной рядом пластины (рисунок 8.2).

Напряженность поля при этом наиболее высока у провода и постепенно убывает с приближением к трубе или пластине, становясь недостаточной для электрического пробоя. При напряженности поля, обеспечивающей полную ионизацию газа, между электродами возникает коронный разряд, сопровождающийся образованием светящейся «короны» вокруг проволоки. Поэтому этот электрод получил название *коронирующего*. Противоположно заряженный

электрод, выполненный в виде трубы или пластины, называют *осадительным*. Коронирующие электроды присоединяют к отрицательному полюсу источника тока, а осадительные - к положительному. Благодаря этому оказывается возможным использовать более высокое напряжение без возникновения пробоя.

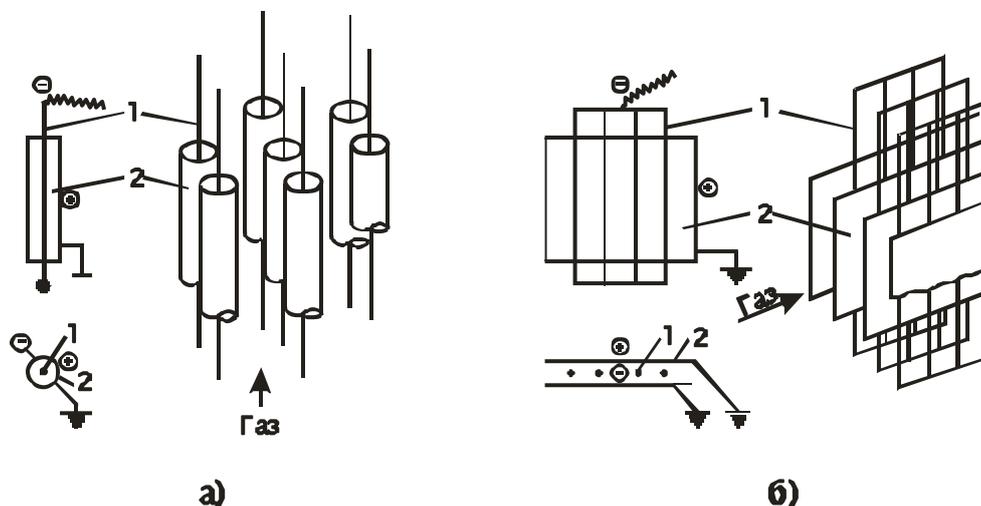


Рисунок 8.2 – Формы электродов трубчатого (а) и пластинчатого (б) электрофильтров:

1 - коронирующие электроды; 2 - осадительные электроды

Образовавшиеся в области «короны» положительные ионы движутся к коронирующему электроду и нейтрализуются на нем. Отрицательные ионы и свободные электроны перемещаются к осадительному электроду. Соприкасаясь со встречными пылинками и капельками, находящимися в газе, они сообщают им свой заряд и увлекают их к осадительному электроду. В результате дисперсные частицы оседают на этом электроде. Некоторая, очень небольшая, часть дисперсных частиц, столкнувшись с положительно заряженными ионами в области «короны» (сечение которой значительно меньше сечения межэлектродного пространства), оседает на коронирующем электроде.

Степень очистки газов в электрофильтре во многом зависит от электропроводности частиц пыли и их адгезионной способности. Если частицы хорошо проводят ток, а силы адгезии невелики, то частица, достигнув осадительного электрода, отдает ему свой заряд, получает заряд электрода и вновь попадает в газовый поток, что снижает степень очистки. Если пыль плохо проводит ток, а силы адгезии существенны, то на электроде образуется плотный слой отрицательно заряженных частиц, противодействующий основному электрическому полю. При большой толщине этого слоя напряжение в его порах может превысить критическое и вызвать коронирование газа у осадительного электрода - «обратную корону». Это явление также снижает эффективность очистки. Его можно предотвратить своевременной очисткой электрода от пыли.

При очистке газов с высокой концентрацией твердых частиц возможно падение силы тока практически до нуля - «запирание короны». Оно связано с тем, что в таких условиях ток переносится исключительно заряженными частицами пыли, а их подвижность мала по сравнению с подвижностью ионов. Для борьбы с этим явлением необходимо уменьшить концентрацию взвешенных частиц, проведя предварительную очистку газа каким-либо другим методом, или же снизить скорость поступающего газа, уменьшая тем самым нагрузку на электрофильтр.

При нормальных условиях работы электрофильтра эффективность газоочистки определяется многими факторами: свойствами газа (химический состав, температура, влажность); свойствами пыли (химический состав, электрические свойства, дисперсность), концентрацией пыли, скоростью газа, параметрами электрофильтра и т.д.

Теоретический учет всех этих факторов практически невозможен, поэтому эффективность газоочистки обычно определяют экспериментально.

Скорость осаждения частиц можно найти из условия равенства силы, движущей частицу, силе сопротивления среды.

Электрическое поле действует на частицу с силой F :

$$F = ne_0E_x, \quad (8.7)$$

где n - число зарядов, полученных частицей; $e_0 = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл - величина элементарного заряда; E_x - напряженность электрического поля, В/м.

Сила сопротивления среды движению шарообразной частицы:

$$R = \xi \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{\rho w_0^2}{2},$$

где d – диаметр частицы, м; w_0 – скорость осаждения частиц, м/с.

При ламинарном режиме осаждения, характерном для электрофильтров, коэффициент лобового сопротивления:

$$\xi = 24/Re.$$

Подставляя ξ и раскрывая значение Re , получим:

$$R = \frac{24\mu}{w_0 d \rho} \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{\rho w_0^2}{2} = 3\pi \mu d w_0, \quad (8.8)$$

где μ - динамический коэффициент вязкости, Па·с.

Приравниваем выражения (8.7) и (8.8):

$$ne_0E_x = 3\pi \mu d w_0.$$

Отсюда

$$w_0 = ne_0E_x / (3\pi \mu d). \quad (8.9)$$

По этой формуле можно рассчитать скорость свободного осаждения в электрическом поле шарообразной частицы с известным зарядом. На практике расчеты по этой формуле трудноосуществимы, поскольку заряд частицы зависит от многих факторов (размера частицы, диэлектрической проницаемости ее материала, напряженности поля и т.д.) и не может быть определен с достаточной точностью. К тому же, как указывалось выше, напряженность поля меняется от максимальной у коронирующего электрода до минимальной у осадительного, поэтому на практике электрофильтры подбирают опытным путем.

8.1.7. Электрофильтры

По форме электродов электрофильтры делятся на трубчатые и пластинчатые, а в зависимости от вида удаляемых из газа частиц на сухие и мокрые. В сухих электрофильтрах очистка газа происходит при температуре выше точки росы и улавливается сухая пыль. Мокрые электрофильтры предназначены для удаления влажной пыли, а также для осаждения взвешенных в газе капель жидкости.

Трубчатый электрофильтр (рисунок 8.3.а) представляет собой аппарат, в котором расположены осадительные электроды 2, выполненные в виде труб диаметром 0,15...0,3 м и длиной 3...4 м. По оси труб проходят коронирующие электроды 1 из проволоки диаметром 1,5...2 мм, которые подвешены к раме 3, опирающейся на изоляторы 5. Запыленный газ выходит в аппарат через штуцер внизу и далее движется внутри труб 2. Пыль оседает на их стенках, а очищенный газ выходит из аппарата через штуцер сверху. В сухих электрофильтрах пыль удаляется периодически путем встряхивания электродов с помощью специального устройства 4. В мокрых электрофильтрах осевшие частицы удаляются периодически или непрерывно промывкой внутренней поверхности электродов водой.

Аналогично устроены и работают пластинчатые электрофильтры (рисунок 8.3.б). Основное отличие их от трубчатых состоит в том, что осадительные электроды выполнены в виде прямоугольных пластин или сеток, натянутых на рамы.

Пластинчатые электрофильтры более компактны, чем трубчатые, с них легче удаляется пыль. В свою очередь, трубчатые электроды позволяют получить большую напряженность электрического поля и поэтому более производительны и обеспечивают лучшее отделение трудноулавливаемых пылей и туманов.

Хотя электрофильтры работают при высоком напряжении постоянного тока (40...75 кВ), расход электроэнергии в них невелик и обычно составляет 0,2...0,3 кВт · ч на 1000 м³ газа. Гидравлическое сопротивление электрофильтров меньше, чем большинства других аппаратов газоочистки, и составляет 150...200 Па. Степень очистки газа от пыли достигает 95...99%.

Электрофильтры характеризуются относительно высокой стоимостью, сложны в эксплуатации, непригодны для очистки газов от частиц с малым электрическим сопротивлением.

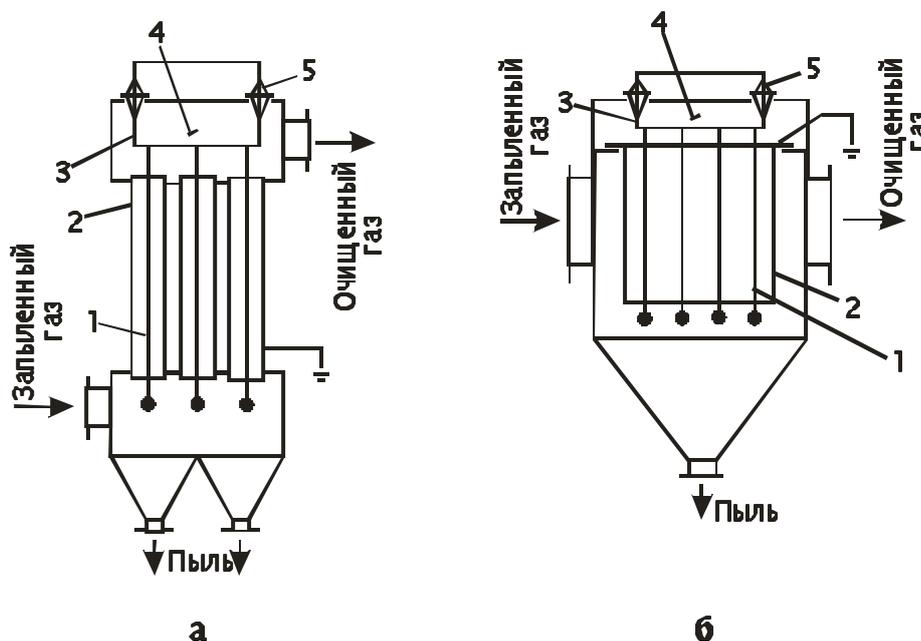


Рисунок 8.3 – Трубчатый (а) и пластинчатый (б) электрофильтры:

1 - коронирующие электроды; 2 - осадительные электроды; 3 - рама; 4 - устройства для встряхивания электродов; 5 - изоляторы

Расчет электрофильтров

Электрофильтры рассчитывают на основе практических данных о допустимой скорости очищаемых газов в электрическом поле электрофильтра. Исходя из этого и из заданного расхода, определяют площадь рабочего (активного) сечения электрофильтров. Конструкцию электрофильтра выбирают также на основании эксплуатационного опыта, исходя из условия обеспечения максимальной степени очистки газового потока. По требуемой площади активного сечения и выбранного электрофильтра определяют необходимое число электрофильтров.

В частных случаях, если имеется возможность точного определения скорости осаждения частиц, степень очистки газа в электрофильтре (в %) может быть определена по формуле

$$\eta = (1 - e^{-w_0 f}) \cdot 100, \quad (8.10)$$

где w_0 - скорость осаждения частиц, м/с; f - отношение площади осадительных электродов к объемному расходу газа, с/м.

8.1.8. Фильтрация газовых неоднородных систем

Фильтры для очистки газов

Принцип действия аппаратов для очистки газов фильтрованием тот же, что и для разделения суспензий, однако при очистке газов в подавляющем большинстве случаев применяют фильтрование с закупориванием пор. Теоретическое описание такого процесса практически невозможно, поэтому расчеты газовых фильтров основываются исключительно на экспериментальных данных.

В зависимости от типа фильтровальной перегородки различают следующие фильтры для очистки газов:

а) с гибкими пористыми перегородками из природных, синтетических и минеральных волокон (тканевые материалы), нетканых волокнистых материалов (войлок, картон и др.), металлоткани и т.п.;

б) с полужесткими пористыми перегородками (слои из волокон, металлических сеток и др.);

в) с жесткими пористыми перегородками (из керамики, пластмасс, спеченных или спрессованных металлических порошков);

г) с зернистыми перегородками (слой кокса, гравия, песка и др.).

Выбор фильтровальной перегородки определяется размером дисперсных частиц, температурой газа, его химическими свойствами, а также допустимым гидравлическим сопротивлением.

Устройство и принцип работы фильтров для очистки газов рассмотрим на примере рукавных фильтров, относящихся к фильтрам с гибкими пористыми перегородками.

Рукавный фильтр (рисунок 8.4) представляет собой корпус, в котором находятся тканевые мешки (рукава) 1. Нижние открытые концы рукавов закреплены на патрубках трубной решетки 2. Верхние закрытые концы рукавов подвешены на общей раме. Запыленный газ вводится в аппарат через штуцер и попадает внутрь рукавов. Проходя через ткань, из которой сделаны рукава, газ очищается от пыли и выходит из аппарата через верхний штуцер. Пыль осаждается на внутренней поверхности и в порах ткани, при этом гидравлическое сопротивление возрастает. Когда оно достигает максимально допустимого значения, рукава очищают. Для этого их встряхивают с помощью устройства 5, пыль падает в разгрузочный бункер 3 и удаляется из аппарата шнеком 4. Кроме того, рукава продувают воздухом, подаваемым с наружной их стороны, т.е. в направлении, обратном направлению движения очищаемого газа. Для того чтобы рукава при продувке не сплющивались, они снабжены кольцами жесткости.

Чтобы обеспечить непрерывность процесса газоочистки, рукавные фильтры делают состоящими из нескольких секций: пока в одних секциях происходит фильтрование, в других проводится регенерация рукавов.

Для изготовления рукавов обычно используют хлопчатобумажные и шерстяные ткани. При этом возможная температура газа и продувочного воздуха ограничена теплостойкостью ткани. Нижний предел этой температуры должен

быть, по крайней мере, на 10°C выше точки росы (температуры конденсации влаги из газа), в противном случае ткань быстро увлажняется, загрязняется, и ее гидравлическое сопротивление резко возрастает.

Основным достоинством рукавных фильтров является высокая степень очистки газов от тонкодисперсной пыли (частицы размером 1 мкм улавливаются на 98...99%).

К недостаткам их относятся высокое гидравлическое сопротивление (до 2500 Па), сравнительно быстрый износ ткани и закупоривание ее пор, непригодность для очистки влажных газов, а также газов, имеющих высокую температуру. Последнего недостатка лишены фильтры с фильтровальными перегородками на основе металлов, керамики и других термостойких материалов.

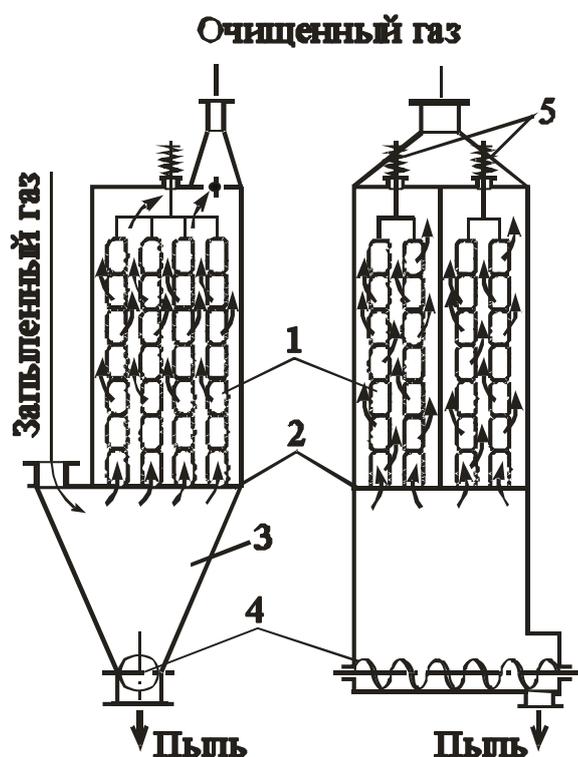


Рисунок 8.4 – Рукавный фильтр:

- 1 - рукава с кольцами жесткости; 2 - трубная решетка; 3 - разгрузочный бункер;
4 - шнек; 5 - устройства для встряхивания рукавов.

Расчет фильтров для очистки газов.

Методику расчета фильтров для очистки газов рассмотрим на примере рукавного фильтра. Основной характеристикой такого фильтра является общая поверхность его рукавов $F_{об}$:

$$F_{об} = z\pi dH, \quad (8.11)$$

где z - общее число рукавов; d - диаметр рукава, м; H - высота рукава, м.

Поскольку в процессе эксплуатации фильтра часть рукавов отключают на регенерацию, общая поверхность рукавов определяется по соотношению

$$F_{об} = F_{ф}z/(z - z_p), \quad (8.12)$$

где $F_{ф}$ - расчетная поверхность фильтрации, m^2 ; z_p - число рукавов, находящихся в процессе регенерации.

Для односекционных фильтров можно принять $z_p = (0,15 \dots 0,20)z$.

Расчетная поверхность фильтрации может быть найдена по формуле

$$F_{ф} = V/w, \quad (8.13)$$

где V - объемный расход газа, поступающего в аппарат, m^3/c ; w - допустимая скорость фильтрации газа через рукава, m/c .

Допустимая скорость фильтрации представляет собой скорость, при которой гидравлическое сопротивление заполненного фильтра достигает максимально допустимой величины, она может быть найдена экспериментально (обычно величина w порядка $1 \cdot 10^{-2} m/c$).

8.1.9. Мокрая очистка газов

Мокрую очистку применяют для очистки газов от пыли или тумана. В качестве промывной жидкости обычно используют воду, реже - водные растворы соды, серной кислоты и других веществ.

Поверхностью контакта фаз между газом и жидкостью может являться поверхность стекающей жидкой пленки (насадочные и центробежные скрубберы), поверхность капель (полые скрубберы, скрубберы Вентури), пузырьков газа (барботажные пылеуловители).

Соприкосновение дисперсных частиц с поверхностью жидкости происходит под действием силы, которая движет частицу. Такими силами могут быть сила тяжести, сила инерции, удары молекул (броуновское движение) и турбулентные пульсации.

При мокром улавливании (за исключением процесса в скрубберах Вентури) газы эффективно очищаются от частиц размером не менее $3 \dots 5$ мкм.

Частицы меньшего размера улавливаются плохо, что обусловлено двумя причинами. Во-первых, мелкие частицы движутся совместно с газовым потоком и огибают мокрую поверхность, не соприкасаясь с ней. Во-вторых, вблизи мокрой поверхности имеется пограничный газовый слой, который мелкая частица далеко не всегда может преодолеть. В скрубберах Вентури, где газ движется с высокой скоростью, силы инерции, возникающие при разрушении вихрей, позволяют частицам преодолевать пограничный ламинарный слой. Поэтому в данных аппаратах возможно улавливание твердых частиц размером $1 \dots 2$ мкм и капелек тумана диаметром до $0,2$ мкм.

Если частицы гидрофобны (гидрофобность – неспособность вещества смачиваться водой), то для эффективного улавливания их они должны обладать дополнительным запасом кинетической энергии, необходимым для работы по преодолению сил поверхностного натяжения.

Раньше в тех случаях, когда была необходима очистка от гидрофобных частиц, для улучшения их смачиваемости к жидкости добавляли поверхностно-активные вещества. Однако такой способ сопряжен с дополнительным загрязнением органическими веществами сточных вод, образующихся при мокрой очистке, и не отвечает современным экологическим требованиям.

Мокрая очистка газов наиболее эффективна в случаях, когда допустимы увлажнение и охлаждение очищаемого газа, а отделяемые частицы имеют незначительную ценность. Охлаждение газа ниже температуры конденсации находящихся в нем паров жидкости способствует увеличению массы частиц, которые служат центрами конденсации, что облегчает их улавливание. Кроме того, водяные пары могут конденсироваться и на поверхности холодных капель. Возникающее при этом движение молекул пара способствует перемещению частиц пыли к каплям. Во многих случаях мокрую очистку применяют для выделения из газа частиц, имеющих большую ценность.

При мокрой очистке образуются сточные воды, содержащие уловленные из газа дисперсные частицы. Если последние могут вызвать загрязнение окружающей среды, необходимо предусмотреть их отделение в отстойниках или устройствах циклонного типа. При этом осветленную жидкость повторно используют для мокрой очистки. Таким образом, одновременно обеспечиваются защита окружающей среды от загрязнения, и экономия свежей воды, которая требуется лишь для подпитки в количестве, теряемом со шламами. Повторное использование осветленной жидкости делает экономически целесообразным отделение от жидкости частиц и в тех случаях, когда они безвредны для окружающей среды.

Полые скрубберы. Простейшими аппаратами для мокрой очистки и одновременного охлаждения газов являются полые скрубберы - вертикальные колонны круглого или прямоугольного сечения. Колонна орошается водой, которая разбрызгивается через форсунки. Запыленный газ может подаваться как снизу колонны, так и сверху. Последний вариант предпочтителен, если мокрая очистка используется для предварительной обработки газов перед очисткой их от пыли в сухих электрофильтрах, рукавных фильтрах и т.д. В этом случае достигается более равномерное распределение газа по сечению колонны и интенсифицируется процесс его охлаждения. Жидкость с уловленной пылью выводится из конического днища.

Если полый скруббер используют главным образом для охлаждения газов, то расход жидкости составляет $0,3 \dots 0,5 \text{ м}^3$ на 1000 м^3 газа. Если основная задача - очистка газа от пыли, то расход жидкости составляет от 3 до 10 м^3 на 1000 м^3 газа.

Степень улавливания пыли тем больше, чем больше расход орошающей жидкости, запыленность газа и размер частиц пыли, но обычно она не превышает 60...75%. Гидравлическое сопротивление полых скрубберов невелико и составляет 100...250 Па.

Насадочные скрубберы. В насадочных скрубберах сечение колонны заполнено насадкой, по которой в виде пленки стекает жидкость. Противотоком к ней движется газ, подаваемый в нижнюю часть колонны. Смоченная поверхность насадки и является поверхностью контакта фаз.

При недостаточном орошении насадки на ее элементах может налипать пыль, что приводит к росту гидравлического сопротивления и снижению производительности скруббера. Очистка насадки от пыли представляет собой довольно трудоемкую операцию, связанную с удалением насадки из аппарата. Поэтому для очистки запыленных газов используют только регулярную насадку с крупными элементами или хордовую насадку.

Расход жидкости в насадочных скрубберах составляет 1,5...6 м³ на 1000 м³ газа. Гидравлическое сопротивление их (200...300 МПа) невелико, хотя и больше, чем полых скрубберов.

Степень улавливания пыли в насадочных скрубберах зависит от тех же факторов, что и в полых. Обычно улавливается до 70% частиц размером 2...5 мкм, более крупная пыль улавливается на 80...90%. Частицы размером 1 мкм и меньше улавливаются плохо.

Центробежные скрубберы. В этих скрубберах процесс мокрой очистки интенсифицируется благодаря проведению его в поле центробежных сил. Схема центробежного скруббера представлена на рисунке 8.5. Запыленный газ поступает со скоростью порядка 20 м/с в цилиндрический корпус 1 через входной патрубок прямоугольного сечения, расположенный тангенциально, и приобретает вращательное движение.

Внутренняя поверхность корпуса непрерывно орошается из сопел (на рисунке не показаны), к которым подводится жидкость из кольцевой питающей трубы 2. Струя, выходящая из сопла, направляется в сторону вращения очищаемого газа тангенциально к поверхности корпуса и смачивает ее. Далее жидкость тонкой пленкой стекает по поверхности корпуса.

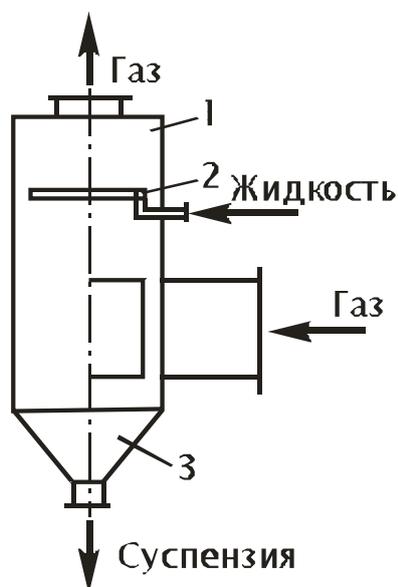


Рисунок 8.5 – Центробежный скруббер:

1 – корпус; 2 – кольцевая оросительная труба; 3 – коническое днище

Взвешенные в поднимающемся по винтовой линии потоке газа частицы пыли под действием центробежной силы отбрасываются к стенкам скруббера, смачиваются пленкой жидкости и улавливаются ею. У патрубка входа газа пленка разрушается, образуя туман, на поверхности капель которого также оседает некоторая часть пыли. Жидкость с поглощенной пылью (суспензия) выводится из аппарата через коническое днище 3. Очищенный газ удаляется через выходной патрубок.

Расход жидкости в центробежных скрубберах составляет $0,1 \dots 0,2 \text{ м}^3$ на 1000 м^3 очищаемого газа. Гидравлическое сопротивление зависит от скорости газа во входном патрубке и диаметра скруббера. При скорости газа на входе в скруббер 20 м/с оно составляет $500 \dots 800 \text{ Па}$.

Степень улавливания пыли больше, чем в насадочных скрубберах: частицы размером $2 \dots 5 \text{ мкм}$ улавливаются примерно на 90% , а размером $15 \dots 20 \text{ мкм}$ - более чем на 95% .

Барботажные (пенные) пылеуловители. Их используют для очистки сильно запыленных газов. В таких аппаратах жидкость, взаимодействующая с газом, приводится в состояние подвижной пены, что обеспечивает бóльшую поверхность контакта фаз.

Барботажный пылеуловитель (рисунок 8.6) представляет собой цилиндрический или прямоугольный корпус 1, в котором находится перфорированная тарелка 2. Вода или другая промывная жидкость через штуцер подается на тарелку. В нижнюю часть аппарата через патрубок подается запыленный газ. Проходя через отверстия тарелки, газ барботирует через жидкость, превращая ее в слой подвижной пены 4. В слое пены пыль поглощается жидкостью, часть которой удаляется из аппарата через переточный порог 3, а другая часть сливается через отверстия в тарелке, промывая их и улавливая в подтарелочном пространстве крупные частицы пыли. Образующаяся суспензия выводится из нижней части аппарата.

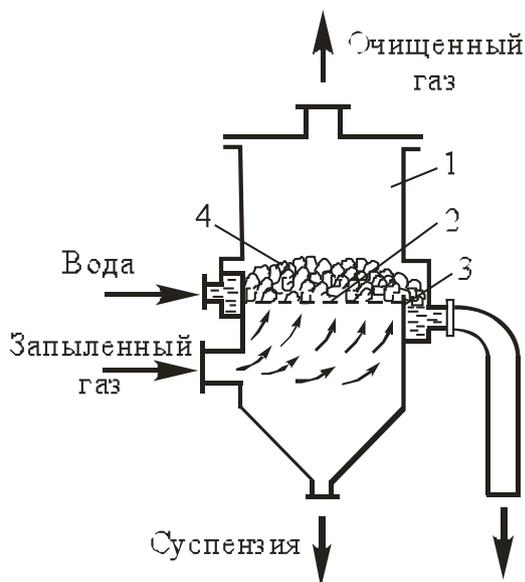


Рисунок 8.6 – Барботажный (пенный) пылеуловитель:

1 – корпус; 2 – тарелка с перфорацией; 3 – переточный порог; 4 – слой пены на тарелке

При большом содержании пыли в газе и высоких требованиях к качеству очистки используют аппараты с двумя-тремя, иногда и с большим числом тарелок.

Расход жидкости в барботажных пылеуловителях составляет $0,2...0,3 \text{ м}^3$ на 1000 м^3 газа. Гидравлическое сопротивление однотарелочных аппаратов $500...1000 \text{ МПа}$.

Пыль с частицами размером $20...30 \text{ мкм}$ улавливается в барботажных аппаратах практически полностью. Частицы размером 5 мкм улавливаются на $80...90\%$. Частицы меньших размеров улавливаются заметно хуже, особенно в случае гидрофобной пыли.

При работе барботажных пылеуловителей недопустимы значительные колебания расхода газа, так как это может привести к нарушению пенного режима и загрязнению отверстий тарелки.

Скрубберы Вентури. Эти аппараты применяют для очистки газов от пылей с преимущественным содержанием фракций мелких частиц.

На рисунке 8.7 показана схема очистки газа, основным аппаратом которой является скруббер Вентури. Запыленный газ вводится через конфузор в трубу Вентури 1. Через отверстия в стенке конфузора туда же впрыскивается вода с помощью распределительного устройства 2. В горловине трубы скорость газа достигает порядка 100 м/с . Сталкиваясь с газовым потоком, вода распыляется на мелкие капли. Высокая степень турбулентности газового потока способствует коагуляции пылинок с каплями жидкости. Относительно крупные капли жидкости вместе с поглощенными частичками проходят через диффузор трубы Вентури, где их скорость снижается до $20...25 \text{ м/с}$, и попадают в циклонный сепаратор 3. Здесь капли под действием центробежной силы отделяются от газа и в виде суспензии удаляются из нижней конической части.

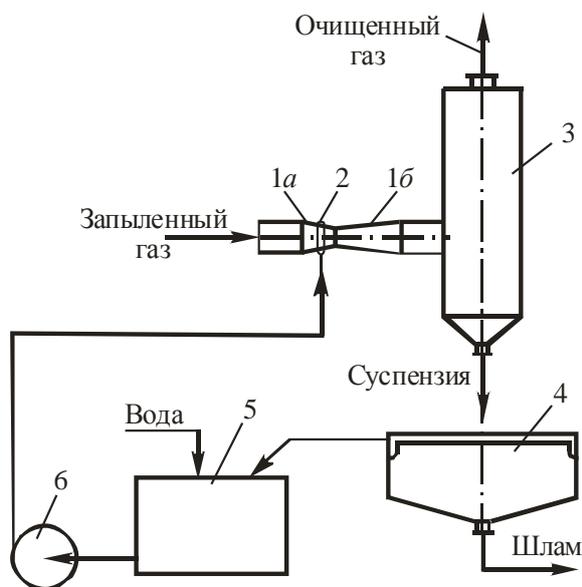


Рисунок 8.7 – Схема очистки газа с применением скруббера Вентури:

1 - труба Вентури (1а - диффузор, 1б - конфузор); 2 - распределительное устройство для подачи воды; 3 - циклонный сепаратор; 4 - отстойник для суспензии; 5 - промежуточная емкость; 6 - насос.

Схема, приведенная на рисунке 8.7, показывает также один из примеров экономии воды при мокрой очистке газов. Так, суспензия, выходящая из циклонного сепаратора, направляется в отстойник 4. Шлам выводится из нижней части отстойника, а осветленная вода из верхней части направляется в промежуточную емкость 5, куда добавляется свежая вода в небольшом количестве, необходимом для компенсации потерь воды со шламом. Далее вода из емкости 5 насосом 6 вновь направляется в распределительное устройство 2 на трубе Вентури.

Для того чтобы скруббер Вентури работал эффективно, необходимо очищенный газ предварительно охладить и насытить водяными парами, например, в полном скруббере. В противном случае в трубе Вентури будет происходить испарение самых мелких капель жидкости, которые наиболее активно участвуют во взаимодействии с частицами пыли.

Расход воды в скрубберах Вентури относительно высок: $0,7...3 \text{ м}^3$ на 1000 м^3 газа. Гидравлическое сопротивление больше, чем в других аппаратах мокрой очистки: $3000...7000 \text{ Па}$. Однако в скрубберах этого типа эффективно улавливаются весьма мелкие частицы: на $95...99\%$ - твердые частицы размером $1...2 \text{ мкм}$ и капельки тумана диаметром $0,2...1 \text{ мкм}$.

Расчет аппаратов мокрой очистки газов. В ряде частных случаев степень очистки газа от взвешенных частиц η может быть рассчитана по эмпирическим формулам. Обычно же ее определение требует проведения экспериментов. Если величина η установлена, то по уравнениям материального баланса мокрого пылеулавливания (8.14) и (8.15) рассчитывают концентрацию пыли в очищенном газе и расход уловленной пыли:

$$C_k = C_n (1 - \eta); \quad (8.14)$$

$$G_{\text{п}} = V_{\text{и}} C_{\text{и}} - V_{\text{к}} C_{\text{к}}; \quad (8.15)$$

где C_k ; C_n - концентрация пыли соответственно в очищенном газе (конечная) и в исходном газе, кг/м^3 ; G_n - расход уловленной пыли, кг/с ; V_n , V_k - объемный расход соответственно исходного газа (начальный) и очищенного (конечный), $\text{м}^3/\text{с}$.

Исходя из значений G_n и концентрации пыли в жидкости, типа аппарата и условий его работы, по эмпирическим соотношениям рассчитывают расход жидкости.

Контрольные вопросы

1. Дать определение аэрозоли и аэрогелю.
2. Перечислите свойства, которые приобретают частицы пыли.
3. Как классифицируют пыль?
4. Как оценивают опасность пыли?
5. Перечислите способы очистки воздуха от пыли.
6. Чем характеризуется работа пылеотделителей?
7. По какому критерию сравнивают эффективность очистки двух пылеотделителей?
8. По каким критериям различаются циклоны?
9. Назовите порядок подбора циклона.
10. Каков принцип работы инерционных пылеотделителей?
11. Каков принцип очистки воздуха от пыли в электрическом поле?
12. Какими факторами определяется эффективность работы электрофильтра?
13. Как классифицируются электрофильтры?
14. Как классифицируют фильтры для очистки газов?
15. Каков принцип работы рукавного фильтра?
16. Каков принцип мокрой очистки газов?
17. Каков принцип работы полого скруббера?
18. Каков принцип работы насадочного скруббера?
19. Каков принцип работы центробежного скруббера?
20. Каков принцип работы барботажного пылеуловителя?
21. Каков принцип работы скруббера Вентури?

8.2. Вентиляторы

Вентиляторами называют воздуходувные машины для перемещения воздуха или других газов. В вентиляторе основной рабочий элемент - свободно вращающееся колесо с лопатками. К вентиляторам условно относят воздуходувные машины, которые создают давление не более 15000 Па.

Вентиляторы вентиляционных и пневмотранспортных установок подразделяют по развиваемому давлению на три группы:

низкого давления.....до 1000 Па
среднего давления.....до 3000 Па
высокого давления.....более 3000 Па

Для перемещения чистого или малозапыленного воздуха в вентиляционных установках применяют вентиляторы низкого или среднего давления, а для установок пневмотранспорта отходов и пыли - вентиляторы среднего давления. Вентиляторы высокого давления применяют для установок пневмотранспорта зерна и продуктов его размола.

По принципу действия и конструктивным особенностям различают вентиляторы центробежные и осевые. При малых давлениях и относительно большой подаче воздуха целесообразно применять осевые вентиляторы как более простые в конструктивном отношении и более экономичные.

8.2.1. Центробежные вентиляторы

Схема устройства. Центробежный вентилятор (рисунок 8.8) состоит из колеса с лопатками 1, помещенного в улиткообразный кожух 3. Вал колеса с приводным шкивом 4 установлен на подшипниках 5. Воздух поступает во всасывающее отверстие 2 вентилятора параллельно оси вала. Затем попадает в каналы между лопатками вращающегося рабочего колеса и под влиянием центробежной силы направляется к выходному отверстию 7.

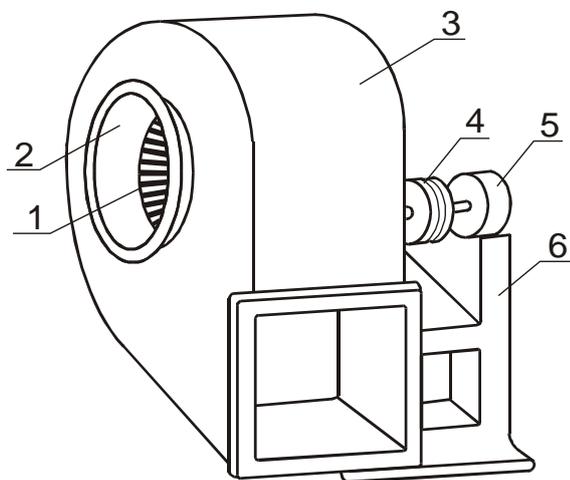


Рисунок 8.8 – Центробежный вентилятор:

1 - колесо (ротор); 2 - всасывающее отверстие; 3 - улиткообразный кожух; 4 - шкив; 5 - подшипник; 6 - станина; 7 - выходное отверстие.

Спиральный кожух 3 собирает воздух и направляет его к выходному отверстию вентилятора, одновременно преобразуя часть скоростного давления воздушного потока, выходящего из рабочего колеса, в статическое. Рабочее колесо вращается на валу, который приводится в движение через шкив 4 плоскостной или клиноременной передачей. Иногда вал рабочего колеса вентилятора непосредственно соединяют с электродвигателем муфтой, а для малой мощности (до

№ 6 включительно) рабочее колесо можно непосредственно насаживать на вал электродвигателя.

Аэродинамические свойства вентилятора определяются значением критерия быстроходности и коэффициента давления.

Критерий быстроходности выражается удельной частотой вращения колеса n_y , которая зависит от производительности q ($\text{м}^3/\text{с}$) стандартного воздуха (плотностью $\rho = 1,2 \text{ кг}/\text{м}^3$), давления H (Па) и частоты вращения рабочего колеса n в минуту при максимальном к.п.д. (η_{max}) вентилятора. Критерий быстроходности выражается формулой:

$$n_y = 5,8 \frac{\sqrt{q \cdot n}}{H_b}, \quad (8.16)$$

где q - расход воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$; H_b - давление вентилятора, Па; n - частота вращения, об/мин.

Как видно из формулы (8.16), вентиляторы с большими расходами и малыми давлениями имеют бóльшую быстроходность.

Критерий быстроходности сохраняет одинаковое значение для всех номеров вентиляторов данной серии, различных по размерам, но геометрически подобных, и характеризует, таким образом, аэродинамические свойства вентиляторов данного типа.

Коэффициент давления выражается зависимостью:

$$\bar{H} = \frac{2H}{\rho u^2}, \quad (8.17)$$

где H - давление, развиваемое вентилятором на оптимальном режиме, Па; ρ - плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$; u - окружная скорость на концах лопаток колеса, $\text{м}/\text{с}$.

Коэффициент давления для центробежных вентиляторов равен $0,4 \dots 1,5$, а для осевых - $0,05 \dots 0,2$.

Лопатки рабочего колеса центробежных вентиляторов (рисунок 8.9) в зависимости от направления выходных кромок могут быть: загнуты вперед $\beta_2 < 90^\circ$, радиальные $\beta_2 = 90^\circ$ и загнуты назад $\beta_2 > 90^\circ$. Угол β_2 образован направлениями лопатки и окружной скорости выходной кромки лопаток по направлению вращения.

Для безударного входа воздушного потока входные кромки лопаток центробежных вентиляторов должны быть отогнуты в направлении, обратном направлению вращения ($\beta_1 > 90^\circ$).

Профиль кожуха центробежного вентилятора соответствует архимедовой спирали.

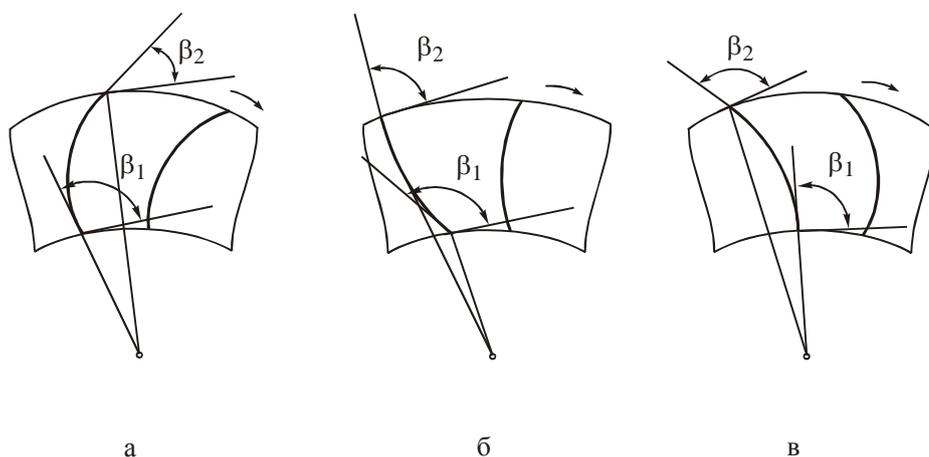


Рисунок 8.9 – **Форма лопаток рабочего колеса вентилятора:**
 а - загнуты вперед; б - радиальные; в - загнуты назад.

На выходе из вентилятора устанавливают диффузор, в котором часть скоростного давления в результате уменьшения скорости воздушного потока преобразуется в статическое. Диффузор устанавливают так, чтобы его скос совпал со скосом воздушного потока, в противном случае будут созданы дополнительные потери давления.

Корпуса вентиляторов изготавливают сварными, клепанными, литыми или соединенными на фланцах. Большие вентиляторы имеют корпуса, состоящие из двух или трех частей, скрепляемых на фланцах болтами. Боковые стенки корпуса для исключения их вибрации вследствие пульсаций давления воздушного потока оребряют металлическими полосами. У малых вентиляторов корпус крепят к станине или непосредственно к корпусу электродвигателя, у больших вентиляторов корпус устанавливают на самостоятельных опорах.

8.2.2. *Обозначение центробежных вентиляторов*

Центробежные вентиляторы изготавливают с различными положениями кожуха, и в зависимости от направления выходного отверстия их принято обозначать: вверх - В, вниз - Н, влево - Л, вправо - П. Кроме того, возможны промежуточные положения под углом 45° к горизонтали: ВЛ, ВП, НЛ, НП.

Различают вентиляторы правого вращения (правые) с рабочим колесом, вращающимся по часовой стрелке, если смотреть со стороны всасывающего патрубка, и левого вращения (левые) с рабочим колесом, вращающимся против часовой стрелки.

Для характеристики размера (величины) вентилятора каждому из них присваивают номер. За номер вентилятора принимают величину, соответствующую диаметру рабочего колеса по внешней кромке лопаток, выраженную в дециметрах. Например, вентилятор с диаметром рабочего колеса $D = 500$ мм соответствует № 5, с $D = 630$ мм - № 6,3.

Центробежные вентиляторы обозначают шифром, в котором буква показывает класс вентилятора, например Ц - центробежный, ЦП - центробежный пылевой. Цифра около буквы обозначает 10-кратное значение коэффициента

давления, округленного до целого числа, цифра после дефиса - значение критерия быстроходности, также округленного до целого числа. Последняя цифра показывает номер вентилятора. Указывается также исполнение по конструктивной схеме и направление вращения рабочего колеса.

Например, вентилятор марки Ц4-70 № 6 исполнение 1, правый расшифровывается так: центробежный вентилятор с коэффициентом давления 0,4, критерием быстроходности 70, диаметром рабочего колеса 600 мм, выполнен по схеме 1 правого вращения.

Для обеспечения производительности и давлений в больших пределах промышленность выпускает вентиляторы сериями. Каждая серия включает разные по размерам, но геометрически подобные вентиляторы.

Центробежные вентиляторы различают по способу привода (рисунок 8.10).

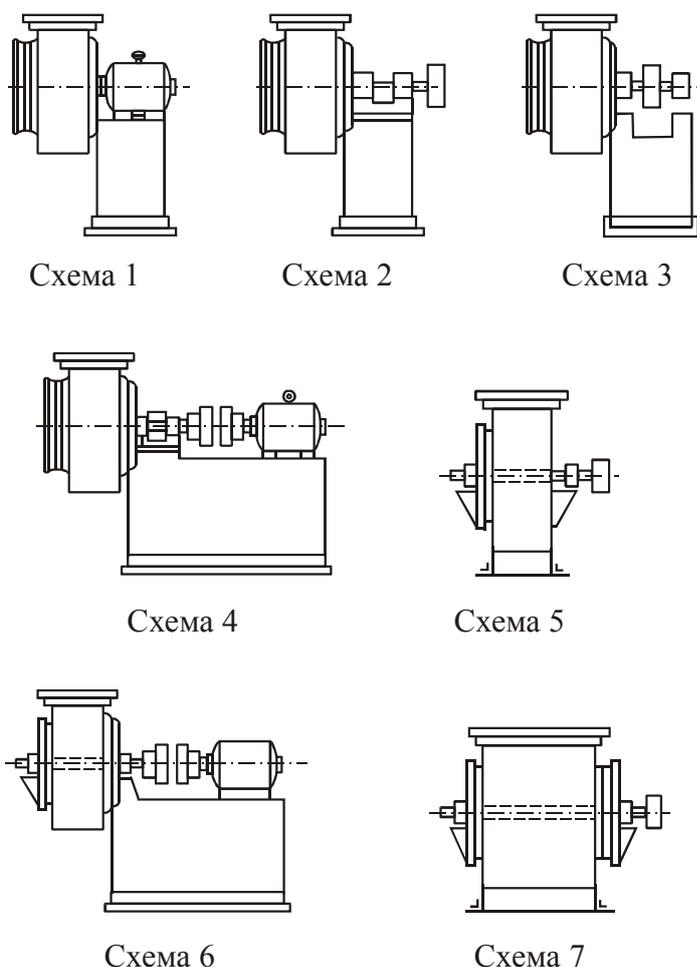


Рисунок 8.10 – Схемы соединений центробежных вентиляторов с электродвигателем:

- 1- с колесом, насаженным непосредственно на вал электродвигателя;
- 2- с вынесенным шкивом или муфтой;
- 3- со шкивом между двумя подшипниками;
- 4- с вынесенной муфтой и электродвигателем на общей стойке;
- 5- с колесом между двумя подшипниками и вынесенным шкивом;
- 6- с колесом между двумя подшипниками, муфтой и электродвигателем на общей стойке;

7- двусторонний вентилятор с колесом между двумя подшипниками и с вынесенным шкивом.

8.2.3. Осевые вентиляторы

Расположенное в цилиндрическом кожухе 3 (рисунок 8.11) лопастное колесо 2, вращаясь, засасывает через входное отверстие 1 воздух и лопатками перемещает его к выходному отверстию 5, снабженному диффузором 4.

В отличие от центробежных, осевые вентиляторы не изменяют направления воздушного потока. В вентиляторах небольших размеров лопастное колесо насаживается на вал электродвигателя, закрытого обтекателем.

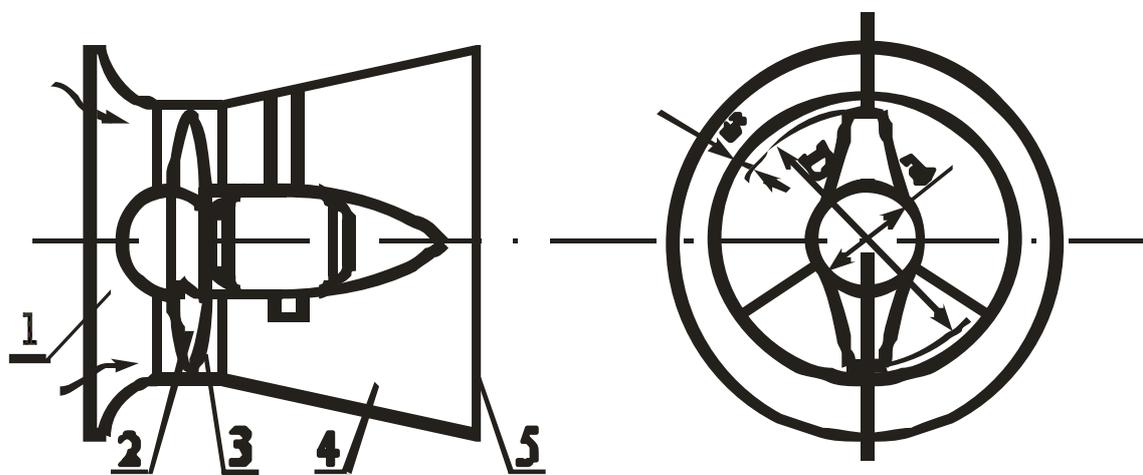


Рисунок 8.11 – Схема осевого вентилятора:

1 – входное отверстие; 2 – лопастное колесо; 3 – кожух; 4 – диффузор; 5 – выходное отверстие.

Электродвигатель расположен внутри кожуха. Чтобы не подвергать электродвигатель воздействию воздушного потока, загрязненного пылью или газами, вал удлиняют и устанавливают дополнительные подшипники. Это позволяет вынести электродвигатель за пределы кожуха. Электродвигатель соединяют с валом колеса муфтой или передачей с плоским или клиновидным ремнем.

Для повышения эффективности работы осевого вентилятора входное отверстие рекомендуется снабжать диффузором. Зазор между концами лопаток и внутренней поверхностью цилиндрического кожуха не должен превышать 1,5% длины одной лопатки, т.е. $\delta < 0,015(D - d)/2$. Увеличение зазора может намного ухудшить аэродинамические свойства осевого вентилятора.

Осевые вентиляторы бывают реверсивные и нереверсивные. В реверсивных независимо от направления вращения сохраняется нормальная аэродинамическая характеристика. Реверсивные осевые колеса обычно имеют симметричный профиль лопаток, напоминающий в сечении чечевицу.

Осевые нереверсивные вентиляторы, у которых колеса вращаются по часовой стрелке, если смотреть на набегающий поток, называют правыми, и левыми, если колеса вращаются против часовой стрелки.

Колесо осевого вентилятора состоит из втулки и лопаток. Лопатки к втулкам приклепывают, приваривают или крепят при помощи стержней. Применяют также штампованные колеса из листового металла, пластмассы или литые. Стержневое крепление позволяет устанавливать лопатки под разными углами к плоскости вращения колеса.

В ряде конструкций для повышения к.п.д. вентилятора лопасти по мере приближения к втулке расширяют и закручивают, однако такая конструкция усложняет изготовление колеса.

Осевые вентиляторы при больших расходах воздуха развивают сравнительно небольшие давления. Предел применения центробежных и осевых вентиляторов можно охарактеризовать критерием быстроходности: при $n_y < 100$ обычно применяют центробежные, а при $n_y > 100$ – осевые вентиляторы.

Осевые вентиляторы компактнее центробежных и имеют бóльший к.п.д.; их применяют для перемещения больших объемов воздуха при небольших давлениях.

8.2.4. Диаметральные вентиляторы

Диаметральный вентилятор (рисунок 8.12) представляет собой лопаточное колесо барабанного типа, установленное в спиральный или коленообразный корпус.

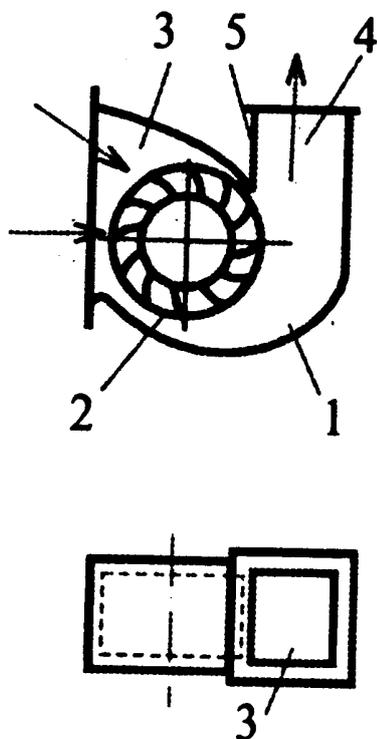


Рисунок 8.12 – Диаметральный вентилятор:

1 – корпус; 2 – колесо; 3 – входной патрубок; 4 – выходной канал; 5 – «язык».

Колесо, закрытое с торцов, имеет криволинейные, загнутые вперед лопатки. Корпус состоит из основания, «языка» и боковых стенок. Эти элементы образуют выходной канал (диффузор) для отвода воздушного потока. При вращении колеса воздух захватывается лопатками из входного патрубка и движется в межлопаточных каналах в центростремительном направлении. Пройдя внутреннее пространство решетки, воздух вновь захватывается лопатками колеса, проходит их межлопаточные каналы в центробежном направлении и далее поступает в выходной канал.

Воздух движется в плоскостях, пер-

пендикулярных оси вращения колеса, вследствие чего вентиляторами создается плоскопараллельный поток. Поэтому данные вентиляторы можно изготавливать большой ширины при сравнительно небольшом диаметре. Лопатки диаметральных вентиляторов выполняются из листового металла и, как правило, в сечении представляют собой дугу окружности. Количество лопаток в колесе составляет от 12 до 64. Корпус вентилятора выполняется из листовой стали с плоскими боковыми стенками. Они с «языком» и основанием соединяются либо на фланцах, скрепляемых болтами, либо сваркой. Критерий быстроходности диаметральных вентиляторов составляет 35...80.

8.2.5. Работа вентилятора в сети

При перемещении воздуха вентилятор должен преодолеть сопротивление во всасывающей и нагнетательной сети. Необходимо также учесть потерю скоростного давления при выходе воздуха в атмосферу. Эти потери принимают как местное сопротивление с коэффициентом сопротивления $\xi = 1$.

Таким образом, полное (общее) давление H_B (Па), развиваемое вентилятором, будет равно сумме потерь давлений во всасывающей и нагнетательной сетях плюс потеря скоростного давления при выходе воздушного потока из сети, т.е.

$$H_B = \Sigma H_{вс} + \Sigma H_n + (\rho w_{вых}^2)/2, \quad (8.18)$$

где $\Sigma H_{вс}$ - суммарные потери давления на линии всасывания сети, Па; ΣH_n - суммарные потери давления на линии нагнетания сети, Па; $H_{ск} = (\rho w_{вых}^2)/2$ - скоростное давление при выходе воздушного потока в атмосферу, Па.

Если в объемах, откуда откачивается воздух и куда он нагнетается, существует избыточное давление, то давление, развиваемое вентилятором, будет иметь вид:

$$H_B = p_2 - p_1 + \Sigma H_{вс} + \Sigma H_n + \frac{\rho w_{вых}^2}{2}, \quad (8.19)$$

где p_1 - давление в объеме, откуда откачивается воздух, Па; p_2 - давление в объеме, куда он нагнетается, Па.

Давление, развиваемое вентилятором, можно определить и так:

$$H_B = \left(H_{ст.н} + \frac{\rho w_n^2}{2} \right) - \left(H_{ст.вс} + \frac{\rho w_{вс}^2}{2} \right), \quad (8.20)$$

где $H_{ст.н}$ и $H_{ст.вс}$ - статические давления непосредственно после вентилятора и до него, Па; w_n , $w_{вс}$ - скорости воздуха в нагнетательном и всасывающем воздухопроводах, м/с.

Полное и статическое давления имеют отрицательное значение во всасывающем воздухопроводе. В нагнетательном воздухопроводе полное давление всегда положительно, статическое - положительно, если $H_B > H_{ск}$, и отрицательно, если $H_B < H_{ск}$, что имеет место при установке за вентилятором плавного диффузора.

8.2.5. Определение мощности вентилятора

Эффективная мощность вентилятора N_v (кВт) – это работа, которую выполнил бы вентилятор в 1с при перемещении q ($\text{м}^3/\text{с}$) количества воздуха при полном давлении H_v (Па). Давление, развиваемое вентилятором, принято при следующих параметрах воздуха: $t = 20^\circ\text{C}$ ($T = 293 \text{ K}$), $\varphi = 50\%$, $p = 760 \text{ мм рт. ст.}$ (101366 Па), $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$.

Мощность на валу вентилятора N_v (кВт) равна:

$$N_v = \frac{qH_v}{1000\eta_v}, \quad (8.21)$$

где η_v - к.п.д. вентилятора, который определяют по характеристике вентилятора.

Мощность на валу электродвигателя при к.п.д. привода $\eta_{\text{п}}$, учитывающего потери в подшипниках, выражается формулой:

$$N = \frac{qH_v}{1000\eta_v\eta_{\text{п}}}. \quad (8.22)$$

При непосредственной посадке колеса вентилятора на вал электродвигателя принимают $\eta_{\text{п}} = 1$; при соединении вала вентилятора с валом электродвигателя муфтой $\eta_{\text{п}} = 0,98$; при приводе с клиновидными ремнями $\eta_{\text{п}} = 0,96 \dots 0,98$; при приводе с плоскими ремнями $\eta_{\text{п}} = 0,9$.

Если производительность вентилятора выражена величиной $Q \text{ м}^3/\text{ч}$, то формула имеет вид:

$$N = \frac{QH_v}{3,6 \cdot 10^6 \eta_v \eta_{\text{п}}}. \quad (8.23)$$

При перемещении воздуха с температурой $t \neq 20^\circ\text{C}$ мощность вентилятора N_t будет равна:

$$N_t = N_{20^\circ} \frac{293}{t + 273}, \quad (8.24)$$

где N_{20° - мощность вентилятора при температуре воздуха 20°C .

При определении установочной мощности электродвигателя для привода вентилятора необходимо учитывать коэффициент запаса мощности K_1 на пусковой момент.

Коэффициент K_1 для центробежных вентиляторов принимают в зависимости от мощности на валу электродвигателя:

Мощность, кВт	Значение K_1
до 0,5	1,50
0,51...1,0	1,30
1,01...2,0	1,20
2,01...5,0	1,15
более 5,0	1,10

Таким образом,

$$N_{\text{уст}} = K_1 N. \quad (8.25)$$

Для осевых вентиляторов коэффициент K_1 принимают равным 1,1 независимо от мощности.

8.2.6. Подбор вентилятора для сети

Вентилятор подбирают по графикам-характеристикам. Характеристика вентилятора графически выражает связь между основными параметрами вентилятора: производительностью, давлением, к.п.д. и частотой вращения колеса. Характеристики вентилятора подразделяют на индивидуальные и обезличенные.

Индивидуальная характеристика. Она относится к вентилятору определенного типа и размера. Индивидуальную характеристику строят в координатах QH с нанесением кривых постоянных η_v и n .

Вентилятор для сети подбирают по количеству перемещаемого воздуха Q и полному давлению H . Вентилятор необходимо выбирать с максимальным значением к.п.д., но не ниже $0,9\eta_{\text{max}}$.

Иногда используют индивидуальные характеристики, построенные в координатах $\lg Q$ и $\lg H$. Их называют логарифмическими графиками. На осях координат откладывают деления $\lg Q$ и $\lg H$, а на соответствующих делениях этих шкал наносят значения величин Q и H . Линии $\eta_v = \text{const}$ в логарифмических графиках превращаются в прямые (рисунок 8.12).

При выборе вентилятора на индивидуальной характеристике находят точку, которая соответствует расходу воздуха и потерям давления вентиляционной сети. Через нанесенную точку пройдут линии, показывающие к.п.д. и частоту вращения колеса вентилятора. Обычно рассматривают ряд характеристик и выбирают вентилятор с максимальным к.п.д.

Обезличенная характеристика. Наряду с индивидуальными пользуются обезличенными (безразмерными) характеристиками вентилятора, которые на одном графике позволяют определить зависимости между основными параметрами для серии геометрически подобных вентиляторов (рисунок 8.13).

Обезличенные характеристики в отличие от индивидуальных строят в координатах, где по оси абсцисс откладывают скорость воздушного потока в выходном отверстии вентилятора $w_{\text{вых}}$, а по оси ординат – развиваемое давление H . Вместо кривых, обозначающих частоту вращения колеса вентилятора, показаны окружные скорости рабочего колеса

$$u = (\pi D n) / 60.$$

К обезличенной характеристике прилагают таблицу, в которой для всех номеров вентиляторов данной серии указаны значения наружного диаметра рабочего колеса и площадь выходного отверстия кожуха.

Вентилятор по обозначенной характеристике подбирают в следующем порядке:

- 1) по заданному давлению H в соответствии с максимальным значением к.п.д. на обозначенной характеристике определяют предварительную скорость выхода воздушного потока $w'_{\text{ВЫХ}}$;

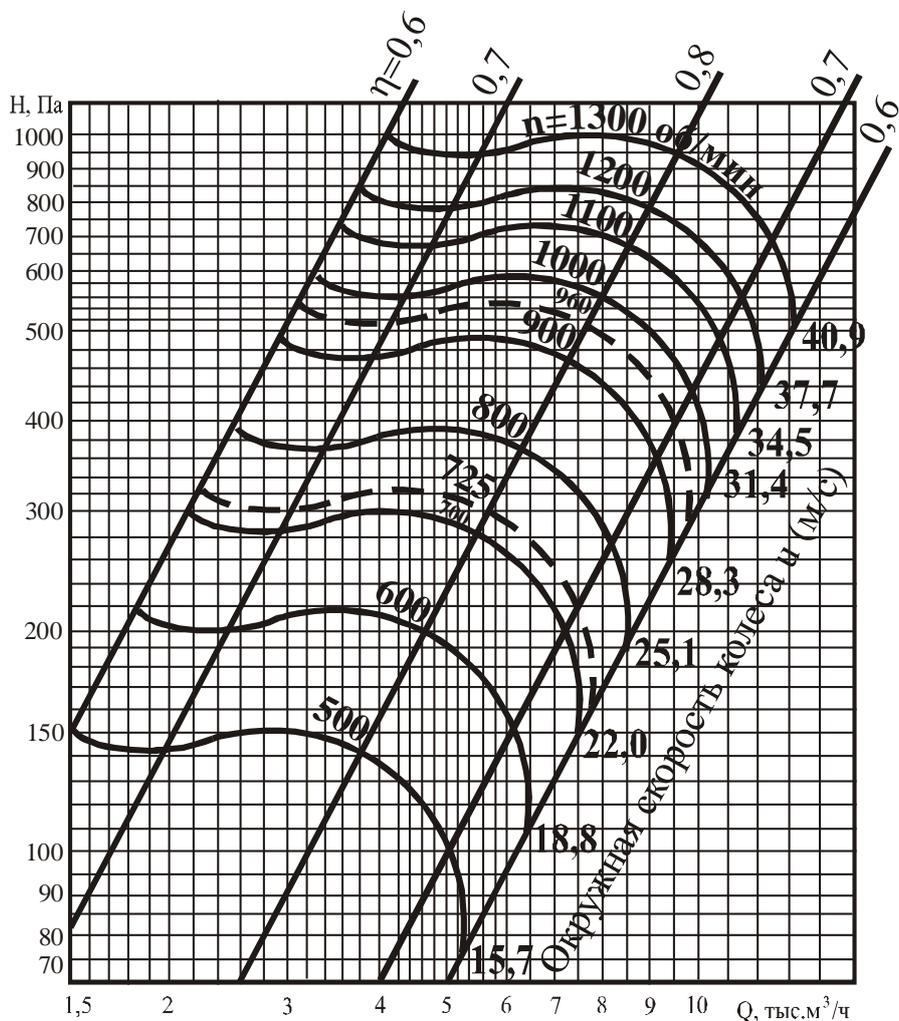


Рисунок 8.12 – Индивидуальная характеристика вентилятора Ц4-70 № 6.

- 2) по заданной производительности Q и найденной $w'_{\text{ВЫХ}}$ вычисляют предварительную площадь $F'_{\text{ВЫХ}}$ выходного отверстия вентилятора

$$F'_{\text{ВЫХ}} = \frac{Q}{3600w'_{\text{ВЫХ}}}; \quad (8.26)$$

- 3) в таблице находят ближайшее значение $F_{\text{ВЫХ}}$, а также номер вентилятора и диаметр колеса;

- 4) по заданной производительности Q и найденной действительной площади выходного отверстия $F_{\text{вых}}$ определяют действительную скорость выхода воздуха:

$$w_{\text{вых}} = \frac{Q}{3600F_{\text{вых}}}; \quad (8.27)$$

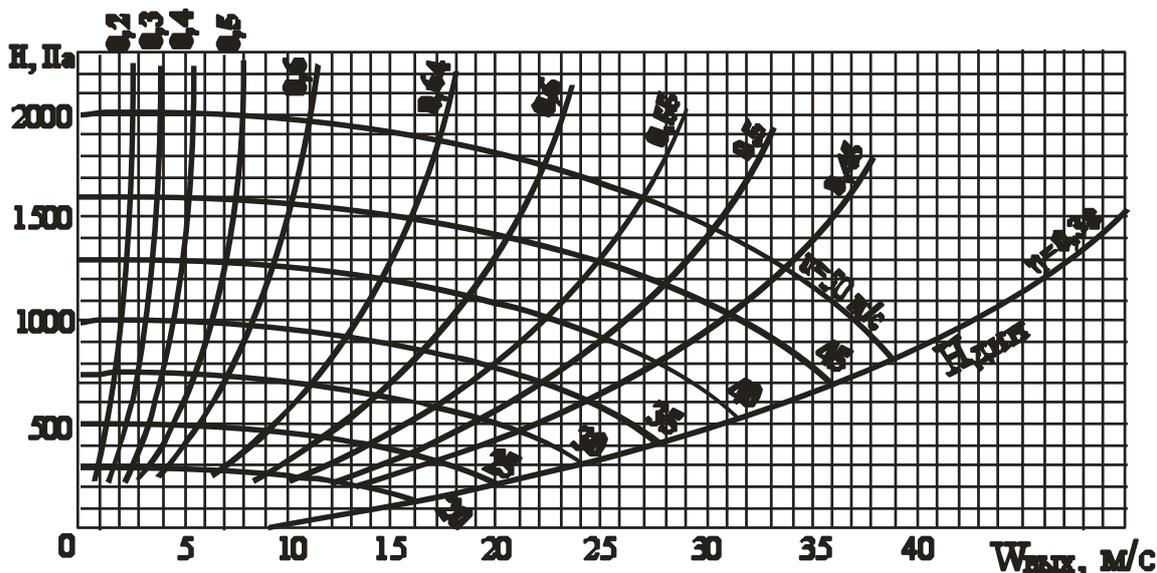


Рисунок 8.13 – Обезличенная характеристика вентиляторов ЦАГИ.

- 5) по данному давлению H и вычисленной $w_{\text{вых}}$ по характеристике определяют η и окружную скорость рабочего колеса u ;
 6) по значениям окружной скорости и диаметру рабочего колеса определяют для вентилятора частоту вращения колеса

$$n = \frac{60u}{\pi D}. \quad (8.28)$$

8.2.7. Законы пропорциональности

При работе вентилятора на определенную сеть изменение частоты вращения его колеса вызовет изменение режима работы, характеризуемого законом пропорциональности.

Законы пропорциональности устанавливают, как изменяется производительность, развиваемое давление и мощность при изменении частоты вращения колеса.

1. Объем перемещаемого вентилятором воздуха изменяется пропорционально частоте вращения:

$$\frac{Q}{Q_1} = \frac{n}{n_1}. \quad (8.29)$$

2. Давление, развиваемое вентилятором, изменяется пропорционально квадратам частот вращения:

$$\frac{H}{H_1} = \frac{n^2}{n_1^2}. \quad (8.30)$$

3. Мощность вентилятора изменяется пропорционально третьей степени частот вращения:

$$\frac{N}{N_1} = \frac{n^3}{n_1^3}. \quad (8.31)$$

Контрольные вопросы

1. Опишите устройство центробежного вентилятора.
2. Какими параметрами определяются аэродинамические свойства вентилятора?
3. Для чего на выходе из вентилятора устанавливают диффузор?
4. Расшифруйте обозначение центробежных вентиляторов.
5. Опишите устройство осевого вентилятора.
6. Что значит реверсивный и нереверсивный вентилятор?
7. Перечислите способы изготовления колес осевых вентиляторов.
8. Как определяется давление, развиваемое вентилятором?
9. Чем отличаются индивидуальная и обезличенная характеристики вентилятора?
10. Опишите порядок подбора вентилятора по обезличенной характеристике.
11. Напишите законы пропорциональности.

8.3. Расчет вентиляционных сетей.

8.3.1. Порядок расчета.

Вентиляционная сеть в зависимости от назначения включает оборудование, подлежащее обеспыливанию, воздухопроводы, пылеотделители, осушительное или увлажнительное оборудование и вентиляторы.

Исходные данные для расчета:

- 1) расход воздуха по нормам для каждой конечной точки сети;
- 2) величина аэродинамического сопротивления оборудования;
- 3) скорости движения воздушного потока в воздухопроводах, которые необходимо поддерживать, чтобы не оседала пыль;
- 4) схема расположения воздухопроводов в сети с указанием длины прямолинейных участков и характеристики фасонных деталей.

Расчетным путем определяют величину полного давления, которое должен развивать вентилятор, и размеры поперечного сечения воздухопроводов каждого участка сети.

Последовательность расчетов:

1. На вычерченную схему сети наносят все данные для расчета: расход воздуха, скорость воздушного потока, длину участков, характеристику фасонных деталей.
Длину участков и характеристику фасонных деталей устанавливают по чертежам вентиляционной сети. Сеть разделяют на участки, которые измеряют. В длину участка входят и длины деталей, за исключением длины тройника.
2. Рассчитывают каждый участок в отдельности.
3. По потерям давлений в отдельных участках определяют магистральное направление и ответвления.
4. Уравнивают потери давлений в ответвлениях до величины потерь давлений в магистрали в точке примыкания.
5. Подбирают пылеотделитель и определяют потери давления в нем.
6. Определяют общие потери давления в сети путем суммирования потерь давления в участках по магистрали, без учета потерь давления в ответвлениях.
7. По заданному количеству отсасываемого воздуха и общим потерям давления в сети подбирают вентилятор и определяют его требуемую мощность.
8. Подбирают электродвигатель с учетом установочной мощности.

8.3.2. Потери давления в вентилируемой машине

Потери полного давления H_m (Па) в точке отсоса из вентилируемой машины зависят от расхода воздуха, их определяют по формуле:

$$H_m = K \cdot q^2, \quad (8.32)$$

где q – расход воздуха в точке отсоса, (m^3/c);

K – коэффициент сопротивления машины, $Pa \cdot c^2/m^6$.

Для каждого типоразмера машины существует своя величина коэффициента сопротивления.

При отклонении расхода воздуха от нормы данной машины изменяется величина потерь давления при сохранении постоянной величины коэффициента сопротивления.

Коэффициент сопротивления приобретает новое значение при каких-либо конструктивных изменениях в машине.

8.3.3. Потери давления в воздухопроводе

Воздухопровод состоит из прямых участков и фасонных деталей. На всем пути перемещения воздушного потока по воздухопроводу возникают силы трения между частицами воздуха, а также между частицами воздуха и стенками

воздухопровода. Кроме того, в местах изменения сечения воздухопровода и направления движения воздушного потока возникают сопротивления.

При турбулентном режиме частицы воздушного потока движутся не только поступательно вдоль оси, но и совершают хаотические поперечные колебания, которые сопровождаются образованием вихрей. В этом случае происходит перераспределение скоростей в потоке, что создает дополнительные потери давления.

Потери давления на прямом участке воздухопровода

Потери давления на преодоление сопротивлений трения в прямой трубе круглого сечения:

$$H_{\ell} = \lambda \cdot \frac{\ell}{D} \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2}, \quad (8.33)$$

где ℓ – длина трубы, м;

λ – коэффициент сопротивления трению;

D – диаметр трубы, м;

w – средняя скорость движения воздуха в трубе, м/с;

ρ – плотность воздуха, кг/м³.

Воздухопроводы, изготовленные из листовой стали, считаются аэродинамически гладкими и для них значение λ принимают в зависимости от величины Re :

Таблица 8.1 – Значение коэффициента сопротивления трению

$Re \leq 2\,300$	$\lambda = \frac{64}{Re}$;
$Re = 2\,300 \dots 100\,000$	$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}}$;
$Re > 100\,000$	$\lambda = 0,0033 + \frac{0,221}{\sqrt[4]{Re}}$.

Для трубы прямоугольного сечения вместо диаметра вводят величину эквивалентного диаметра D_3 , которую определяют из условия равенства отношения периметра к площади поперечного сечения:

$$\frac{\Pi}{F} = \frac{\pi D_3}{\frac{\pi D_3^2}{4}} = \frac{2(a+b)}{ab}$$

Следовательно,

$$D_3 = \frac{2ab}{a+b},$$

здесь периметр $\Pi = \pi D_3$ – для трубы круглого сечения;

$\Pi = 2(a+b)$ – для трубы прямоугольного сечения;

площадь $F = \frac{\pi D^2}{4}$ - для трубы круглого сечения;
 $F = ab$ – для трубы прямоугольного сечения.

При одинаковых скоростях движения воздушного потока потеря давления на трение на 1 м воздухопровода при эквивалентном диаметре D , будет такой же, как и при прямоугольном сечении со сторонами a и b .

Расчет воздухопроводов можно проводить либо методом «полных и скоростных давлений», либо методом потерь давления на 1 м длины трубы. В том и другом случаях используют специальные программы и таблицы.

8.3.4. Потери давления в фасонных частях воздухопровода

Наиболее часто из фасонных деталей встречаются: отвод (колено), конфузор, диффузор, тройник и переходы.

Отвод изменяет направление движения воздушного потока, конфузор сужает поток, диффузор расширяет поток, тройник соединяет два или несколько потоков в один, а переходы служат для изменения формы сечения потока, например, из круглого в прямоугольное или наоборот.

Потери давления в фасонных частях называют местными сопротивлениями.

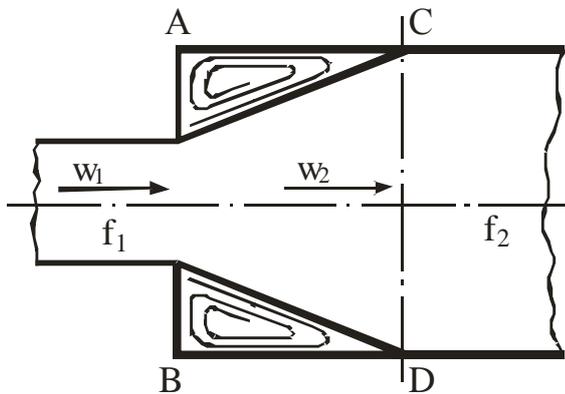


Рисунок 8.14 – Схема движения воздушного потока при внезапном расширении сечения прямолинейного воздухопровода

При переходе из малого сечения f_1 в большое f_2 поток постепенно расширяется и заполняет воздухопровод только в сечении CD . Между сечениями AB и CD образуется кольцевое пространство, в котором воздух находится в беспорядочном вихревом движении. При этом создаются потери давления, определяемые формулой Борд́а-Карно:

$$H_{\text{б.к.}} = \frac{\rho(w_1 - w_2)^2}{2}, \quad (8.34)$$

где w_1 – скорость воздушного потока в малом сечении; w_2 – в большом.

Преобразуя эту формулу, можно записать

$$H_{\text{б.к.}} = \frac{\rho w_1^2}{2} \left(1 - \frac{w_2}{w_1} \right)^2 \quad (8.35)$$

Из уравнения неразрывности струи находим $\frac{w_2}{w_1} = \frac{f_1}{f_2}$, подставляя в последнюю формулу, получим

$$H_{\text{б.к.}} = \frac{\rho w_1^2}{2} \left(1 - \frac{f_1}{f_2}\right)^2 \quad (8.36)$$

Обозначим $\left(1 - \frac{f_1}{f_2}\right)^2 = \xi$ - коэффициент местного сопротивления.

Тогда

$$H_{\text{б.к.}} = \xi \frac{\rho w_1^2}{2} \quad (8.37)$$

Величина ξ зависит от формы фасонной детали. При выходе потока из воздухопровода в бесконечно большое пространство $\xi = \left(1 - \frac{f_1}{\infty}\right)^2 = 1$, а потери

давления $H_{\text{б.к.}} = \frac{\rho w_1^2}{2}$.

Для уменьшения потерь на выхлоп устанавливают диффузор. При этом скорость воздушного потока уменьшается, а следовательно, уменьшается скоростное давление в выхлопном сечении.

Т.к. в каждой фасонной детали существуют вихреобразования и внезапные изменения скорости, то потери давления, вызываемые местными сопротивлениями, определяют по формуле:

$$H_{\text{м.с.}} = \xi \frac{\rho w^2}{2} \quad (8.38)$$

Потери давления в отводе

При повороте потока в отводах скоростное поле изменяется, вследствие чего образуются завихрения у внешней 1 и внутренней 2 стенок отвода (рисунок 8.15).

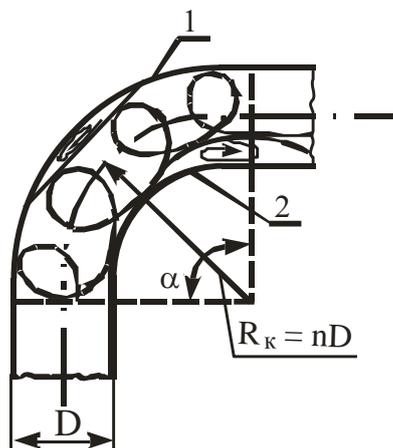


Рисунок 8.15 – Отвод (колесо) круглого сечения

Наибольшая величина потери давления (до 95% от общей потери давления в отводе) у внутренней стенки, где завихрение образуется в результате срыва потока. Т.к. в центральной части воздухопровода скорость потока больше, чем у стенок, центральная часть потока получает еще вращательное движение.

Коэффициент сопротивления отвода зависит от угла поворота воздушного потока α и радиуса закругления R_k , который обычно выражен числом n , кратным диаметру отвода D : $R_k = n \cdot D$ или $n = \frac{R_k}{D}$.

Для уменьшения потерь $R_k \geq (1,5...2,0)D$.

Потери давления в конфузоре (коллекторе)

Конфузор сглаживает переход от большего сечения к меньшему. Потери возникают в результате создания вихрей, сужения потока и формирования поля скоростей при переходе воздушного потока от большего сечения к меньшему.

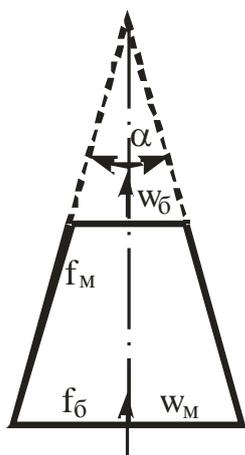


Рисунок 8.16 – Конфузор (коллектор)

Конфузор уменьшает потери давления, снижая скорость входа воздушного потока, а также препятствует попаданию в воздухопровод тяжелых частиц (мелкого зерна, сечки и т.д.)

Коэффициент сопротивления коллектора зависит от угла и степени расширения, т.е. от $\frac{f}{f_m}$. Наименьшие потери давления наблюдаются при малых углах и плавных переходах. Практически угол α не должен превышать 45° . Потери давления определяют по (7.38), только значения ξ берут из соответствующих таблиц. Скоростное давление определяют по большей скорости, т.е. в узком сечении.

Потери давления в диффузоре

Диффузор плавно изменяет сечение воздушного потока от меньшего к большему. Потери давления в диффузоре вызваны отрывом потока от стенок и образованием вихрей.

Диффузор также применяют для увеличения сечения воздухопровода в месте выхода в атмосферу. Коэффициент сопротивления диффузора зависит от угла α и степени расширения. Меньшие потери давления соответствуют меньшим углам α ; при больших углах α потери увеличиваются и при углах более 45° приближаются к потерям, наблюдаемым при внезапном расширении (потери на удар). Поэтому в диффузоре $\alpha \leq 45^\circ$. Потери определяют по формуле (8.38). Скоростное давление определяют по большей скорости, т.е. в узком сечении.

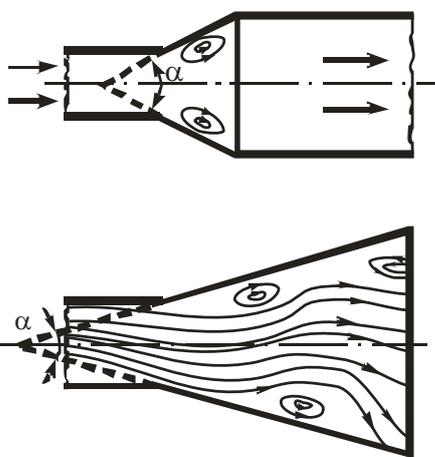


Рисунок 8.17 – Диффузор

Потери давления в тройниках

Тройник (рисунок 8.18) служит для соединения или разветвления воздушных потоков. Его устанавливают как на всасывающей, так и на нагнетательной линии сети. Тройники бывают симметричными и несимметричными.

Потери давления в тройнике возникают вследствие образования вихрей при изменении скоростей и направления движения воздушных потоков.

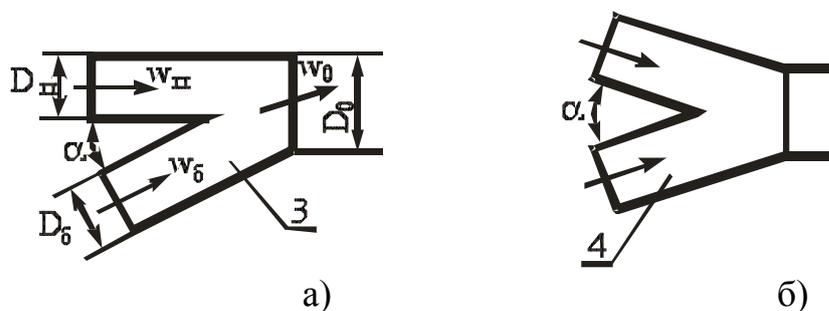


Рисунок 8.18 – Тройник: а) несимметричный; б) симметричный

Потери давления наименьшие, если потоки соединяются при угле $\alpha = 0$. Но даже в этом случае величина потерь будет зависеть от соотношения скоростей $w_п$ и $w_б$.

В тройнике учитывают коэффициенты местных сопротивлений по прямому $\xi_п$ и боковому $\xi_б$ направлениям потоков. Коэффициенты местных сопротивлений тройника зависят от угла соединения или разветвления потоков α , соотношения $w_б/w_п$ и соотношения диаметров $D_п/D_б$ или сечений $f_п/f_б$.

Потери давления в решетках и сетках

Всасывающие отверстия машин, места входа приточного воздуха в помещения, воздухопроводы для предупреждения попадания с воздухом посторонних тел часто перекрывают решетками или сетками. Потери давления зависят от суммарной площади отверстий решетки или сетки, называемой ***живым сечением***.

С достаточной точностью рекомендуется применять значения коэффициентов местного сопротивления для жалюзийных решеток и проволочных сеток в зависимости от соотношения живого сечения F_0 к площади сечения трубы F .

8.3.5. Потери давления в участке воздухопровода, состоящего из прямой трубы и фасонных деталей

Участок воздухопровода характеризуется постоянным расходом воздуха и скоростью движения воздушного потока. К участкам воздухопровода относят и фасонные детали, в отдельных частях которых воздушный поток движется с другой скоростью, а поперечные сечения этих частей отличаются от сечений прямого воздухопровода.

Поэтому потери давления в участке воздухопровода определяют, суммируя потери давления в прямом участке и фасонных деталях:

$$H_{тр} = H_{\ell} + H_{м.с.}$$

$$\text{или} \quad H_{\text{тр}} = \lambda \frac{\ell}{D} \cdot \frac{\rho w^2}{2} + \sum \xi \frac{\rho w^2}{2} \quad (8.39)$$

Преобразовывая, получим

$$H_{\text{тр}} = \left(\lambda \frac{\ell}{D} + \sum \xi \right) \cdot \frac{\rho w^2}{2} \quad (8.40)$$

По этой формуле потери давления определяют по методу «полных и скоростных давлений». Для метода определения «потерь давлений на 1 м длины воздухопровода» используют формулу

$$H_{\text{тр}} = R \cdot \ell + \sum \xi \frac{\rho w^2}{2}, \quad (8.41)$$

где $R = \frac{\lambda}{D} \cdot \frac{\rho w^2}{2}$; $H_i = R \cdot \ell$.

8.3.6. Потери давления в участке вентиляционной сети

Участок сети состоит из аспирируемой машины, фасонных частей и прямого воздухопровода.

Полные потери давления на таком участке складываются из потерь давления в аспирируемой машине, воздухопроводе и фасонных частях воздухопровода:

$$H_{\text{уч}} = H_{\text{м}} + H_{\text{тр}}$$

Вместо $H_{\text{тр}}$ подставим значение из формулы (8.40), тогда получим выражение для определения потерь давления в участке по методу «полных и скоростных давлений»:

$$H_{\text{уч}} = H_{\text{м}} + \left(\lambda \frac{\ell}{D} + \sum \xi \right) \cdot \frac{\rho w^2}{2}, \quad (8.42)$$

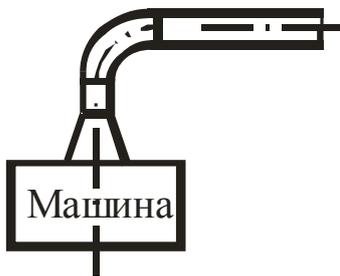


Рисунок 8.19 – Участок вентиляционной сети, состоящий из аспирируемой машины и воздухопровода

а если из формулы (8.41), то по методу определения «потерь давления на 1 м длины воздухопровода»:

$$H_{\text{уч}} = H_{\text{м}} + R\ell + \sum \xi \cdot \frac{\rho w^2}{2}, \quad (8.43)$$

8.3.7. Потери давления в разветвленной вентиляционной сети

Разветвленная вентиляционная сеть состоит из нескольких участков, каждый из которых характеризуется постоянством расхода воздуха и скорости движения воздушного потока.

В разветвленной сети различают магистральное направление и ответвления. Магистральным называют направление сети, в которой сумма потерь давления участков от конечной точки до всасывающего отверстия вентилятора, а в нагнетающей сети до выходного отверстия вентилятора будет наибольшей. Участки сети, не входящие в магистральное направление, называют ответвлениями.

Общую потерю давления разветвленной сети определяют суммированием потерь давления только в участках магистрали (без ответвлений).

Выбирая вентилятор для данной сети, следует учитывать потери давления в магистральном направлении без учета потерь в ответвлениях.

При аспирации нескольких машин с равными сопротивлениями магистральным направлением будет участок, наиболее удаленный от вентилятора.

На рисунке 8.20 показана разветвленная сеть из трех участков. В зависимости от величин потерь давления в участках, магистральным направлением могут быть участки 1-3 или 2-3.

Пусть потери давления в 1-м участке $H_1 > H_2$. Тогда 1-3 будет магистральным, а 2-3 ответвлением.

Вентилятор, выбранный в соответствии с потерями в магистрали, будет развивать давление, превышающее потери давления в участке 2, и, естественно, поток воздуха устремится по пути наименьшего сопротивления, а следовательно, расход воздуха в участке 2 будет больше заданного.

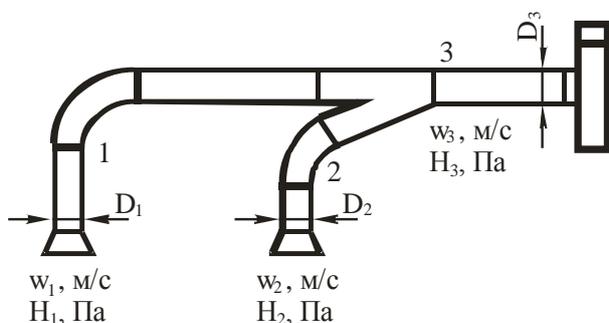


Рисунок 8.20 – Разветвленная всасывающая вентиляционная сеть

Перераспределение расходов воздуха в участках будет происходить до тех пор, пока не уравниваются потери давления в участках 1 и 2. При этом нарушаются условия заданных количеств воздуха, а следовательно, режим работы сети.

Для отсасывания заданных количеств воздуха по обоим направлениям следует увеличить потери давления в ответвлении (уч. 2) до величины H'_2 , равной потере давления в прилегающем участке магистрали, т.е. $H'_2 = H_1$.

Если в сети несколько ответвлений, следует в каждом из них увеличить потери давления до величины потерь давления в месте соединения ответвлений

с магистралью. В этом случае вентилятор будет отсасывать от любого участка заданные расчетом количества воздуха.

Уравнивание потерь давления в ответвлениях

Существует несколько методов. Обязательное условие во всех методах – сохранение заданного количества отсасываемого воздуха. Для увеличения потерь давлений в участках ответвлений можно увеличить скорость движения воздуха в ответвлениях при сохранении заданного количества отсасываемого воздуха и, следовательно, уменьшить диаметр на участке ответвления.

Во втором случае диаметр ответвления не изменяют. В каком-либо сечении ответвления устанавливают диафрагму, задвижку или дроссельный клапан, рассчитанные как местное сопротивление, потери давления которого равны разности между потерями давления в магистрали и ответвлении.

Рассмотрим эти методы.

Уравнивание потерь давления в ответвлениях увеличением скорости движения воздуха и уменьшением диаметра ответвления

Рассмотрим разветвленную сеть из трех участков (рисунок 8.20). Пусть после расчета потерь давления каждого из участков потери давления в первом участке $H_1 > H_2$. Чтобы уравнивать потери давления в ответвлении до величины потерь в прилегающем магистральном участке, необходимо увеличить их до величины $H'_2 = H_1$. Для этого нужно увеличить скорость движения воздушного потока $w' > w_2$. При сохранении в ответвлении заданного расхода и при увеличении скорости диаметр ответвления уменьшится до величины $D'_2 < D_2$.

Рекомендуется формула для определения диаметра ответвления, которая вытекает из того, что при сохранении принятого расхода воздуха и длины участка диаметр ответвления D'_2 может быть определен из следующих соотношений:

- потери давления в участке ответвления до уравнивания:

$$H_2 = \lambda_2 \cdot \frac{\ell_2}{D_2} \cdot \frac{\rho w^2}{2};$$

- после уравнивания: $H'_2 = H_1 = \lambda_2 \cdot \frac{\ell'_2}{D'_2} \cdot \frac{\rho (w'_2)^2}{2}$.

Если подставить в формулы значения скоростей в зависимости от расхода воздуха и диаметров, то, поделив левые и правые части уравнений при условии $\lambda_2 \approx \lambda'_2$, после преобразований получим

$$D'_2 = D_2 \left(\frac{H_2}{H_1} \right)^{1/5} \quad (8.44)$$

Индексы при значениях диаметров и потерь давления должны соответствовать нумерации участков ответвлений и магистрали рассчитываемой схемы вентиляционной сети.

Уравнивание потерь давления в ответвлениях диафрагмой, задвижкой или дроссельным клапаном

Часто для увеличения потерь давления в ответвлениях вентиляционной сети применяют диафрагмы, которыми уменьшают сечение воздушного потока. Отверстие в диафрагме расположено нормально к оси воздухопровода. Увеличение потерь давления происходит из-за внезапного сужения потока и образования вихревых областей, что увеличивает потери давления.

Диафрагмы применяют при аспирации длинных рядов однотипного оборудования, что позволяет делать все ответвления одинакового диаметра, упрощает изготовление воздухопроводов и фасонных деталей и удешевляет стоимость монтажа. Диафрагмы позволяют точнее регулировать объем отсасываемого воздуха, чем при изменении диаметра труб.

Диафрагмы изготавливают с центральным отверстием и односторонние, с отверстием в нижней части поперечного сечения трубы (рисунок 8.21).

Диафрагмы с центральными отверстиями рекомендуют устанавливать только в вертикальных участках воздухопроводов, в горизонтальных она создает скопление пыли и затрудняет очистку. В горизонтальных воздухопроводах лучше применять односторонние диафрагмы, располагая их в верхней части поперечного сечения.

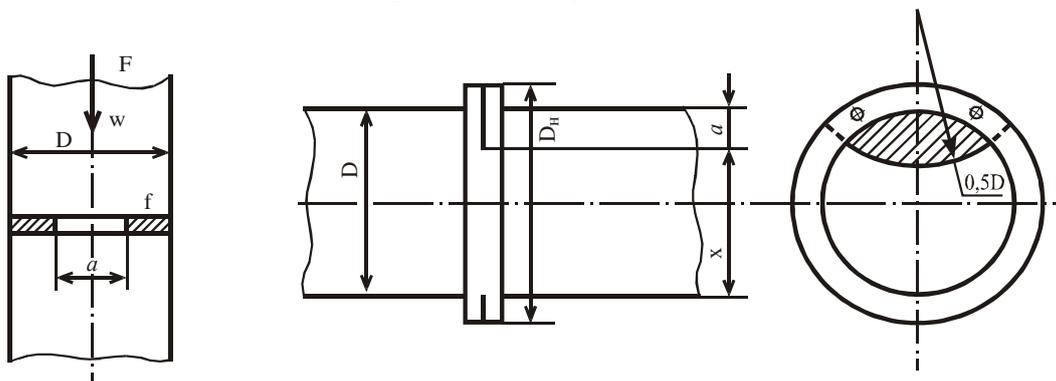
Потеря давления, создаваемая диафрагмой:

$$h_d = \xi_d \frac{\rho w^2}{2}, \quad (8.45)$$

где w – скорость воздуха в участке воздухопровода.

ξ_d зависит от соотношения f/F ,

где f – площадь поперечного сечения диафрагмы с центральным отверстием; F – площадь поперечного сечения воздухопровода; ξ_d определяют по таблицам.



**Рисунок 8.21 – Диафрагма: а) с центральным отверстием;
б) односторонняя**

Диаметр центрального отверстия диафрагмы определяют по потерям давления и средней скорости воздушного потока, пользуясь номограммой.

Для расчета односторонней диафрагмы рекомендуется шкала, в которой приведена зависимость отношений $\frac{a}{D}$ от $\xi_d = \frac{h \cdot 2}{\rho w^2}$. По величине ξ_d определяют на шкале отношение $\frac{a}{D}$, из которого находят a .

При выравнивании давления поворотной заслонкой ξ определяют по таблице в зависимости от угла поворота заслонки.

При задвижке ξ определяют по таблице в зависимости от отношения $\frac{x}{D}$ или $\frac{x}{b}$,

где x – ширина свободного сечения воздухопровода, D – диаметр воздухопровода при его круглом сечении, b – ширина воздухопровода при прямоугольном сечении.

8.3.8. Характеристика вентиляционной сети

Изменение расхода воздуха повлечет за собой изменение потерь давления в вентиляционной сети. Расход воздуха и потери давления находятся в зависимости:

$$H = k \cdot q^n, \quad (8.46)$$

где q – расход воздуха, м³/с; k – коэффициент конфигурации сети; n – зависит от характера течения воздушного потока, обычно $n = 2$.

При изменении q изменяется H , а k остается постоянным.

Для построения графической характеристики вентиляционной сети из уравнения $H = k \cdot q^2$ находят значения k по q и H . По произвольным значениям q и постоянному коэффициенту k определяют соответствующие значения H .

8.3.9. Связь между характеристикой сети и характеристикой вентилятора

Если график индивидуальной характеристики вентилятора, построенный в координатах QH , совместить с графиком характеристики вентиляционной се-

ти, выполненном в том же масштабе, то кривая характеристики сети совпадает с линией к.п.д. вентилятора η_v (рисунок 8.22).

Точка пересечения координат Q и H характеристики сети совпадает с точкой Q и H характеристики вентилятора. Кривая, указывающая частоту вращения колеса вентилятора, пройдет через точку с координатами Q и H . Такую точку называют рабочей точкой системы вентилятор – сеть. Рабочая точка соответствует оптимальному режиму работы вентилятора, при котором обеспечивается нормальная работа системы вентилятор – сеть.

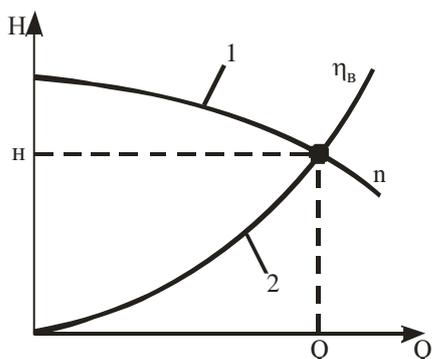
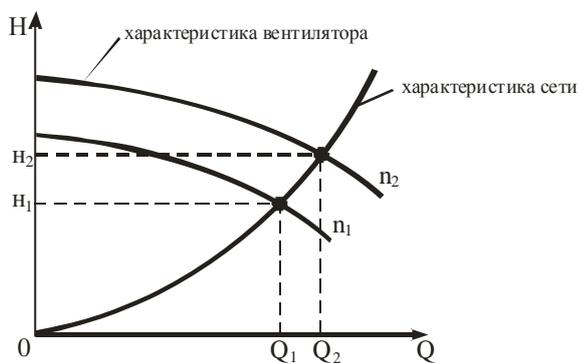


Рисунок 8.22 – Связь характеристики вентиляционной сети с характеристикой вентилятора

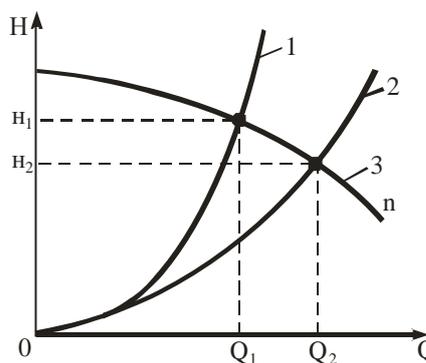
Возможные отклонения в работе вентилятора в сети.

Изменение частоты вращения колеса вентилятора вызовет изменение расхода воздуха и потерь давления в сети (рисунок 8.23.а).

В случае ошибки в расчете вентиляционной сети и неправильного учета потерь давления действительная характеристика сети не совпадет с расчетной, что вызовет изменение действительного расхода воздуха по сравнению с расчетным (рисунок 8.23.б). Например, если потери H_1 были завышены, то действительные потери H_2 окажутся меньше и действительная характеристика сети сместится вправо, при этом и фактический расход воздуха Q_2 в сети окажется выше расчетного.



а



б

Рисунок 8.23 – Влияние изменения частоты вращения колеса вентилятора и давления в сети на работу вентиляционной сети:

1 – расчетная характеристика сети; 2 – действительная характеристика сети; 3 – характеристика вентилятора

Контрольные вопросы

1. Перечислите исходные данные для расчета вентиляционной сети.
2. Опишите последовательность расчета вентиляционной сети.
3. Как определяются потери давления на прямом участке воздухопровода?
4. Перечислите фасонные части воздухопроводов.
5. Напишите формулу Борд́а-Карно.
6. От чего зависит коэффициент сопротивления отвода, конфузора?
7. Какое направление разветвленной вентиляционной сети называют магистральным?
8. Перечислите способы уравнивания давления в ответвлениях.
9. Опишите связь между характеристикой сети и характеристикой вентилятора.
10. Какую точку системы вентилятор - сеть называют рабочей?
11. Что произойдет при изменении частоты вращения колеса вентилятора?

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Сергеев, А.А. Холодильное и вентиляционное оборудование: Учебное пособие./ А.А. Сергеев, ФГОУ ВПО Ижевская ГСХА.- Ижевск: РИО ИжГСХА, 2005.- 144 с.
- 2, Сергеев, А.А. Холодильная технология: Учебное пособие./ А.А. Сергеев, ФГБОУ ВПО Ижевская ГСХА.- Ижевск: РИО ИжГСХА, 2010.- 39 с.
2. Оболенский, Н.В. Холодильное и вентиляционное оборудование: Учебное пособие./Н.В. Оболенский, Е.А. Денисюк - Н. Новгород: Нижегородская ГСХА, 2000.- 156 с.
3. Холодильная техника и технология: Учебник / под ред. А.В.Руцкого.- М.: ИНФРА-М, 2000.
6. Улейский, Н.Т., Холодильное оборудование: Учебное пособие / Н.Т. Улейский, Р.И. Улейская - Ростов-на-Дону: «Феникс», 2000. – 318 с.

Учебное издание

Сергеев Алексей Александрович

**ХОЛОДИЛЬНАЯ ТЕХНИКА, ТЕХНОЛОГИИ
И ВЕНТИЛЯЦИОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ**

Учебное пособие

В авторской редакции

Сдано в набор _____ 2016 Подписано в печать _____ 2016
Формат 60×84 ^{1/16}. Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman.
Усл. печ. л. 7,2. Уч.- изд. л. 8,4. Тираж _____ экз. Заказ № _____
РИО ФГБОУ ВО Ижевская ГСХА
426069. г. Ижевск, ул. Студенческая, 11