

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

Н. А. Фролова

ХОЛОДИЛЬНАЯ ТЕХНИКА В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Учебно-методическое пособие по практическим работам
для студентов, обучающихся по направлениям подготовки
15.03.02 Технологические машины и оборудование

Калининград
Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ»
2025

Рецензент

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой инжиниринга
технологического оборудования ФГБОУ ВО «КГТУ» Д. Б. Подашев

Фролова, Н. А.

Холодильная техника в пищевой промышленности: учебно-методические
указания по практическим работам для студентов, обучающихся по
направлению подготовки 15.03.02 Технологические машины и оборудование /
Н. А. Фролова – Калининград: Изд-во ФГБОУ ВО «КГТУ», 2025. – 66 с.

В учебно-методическом пособии по изучению дисциплины «Холодильная
техника в пищевой промышленности» представлены материалы для проведения
цикла практических работ студентами направления подготовки 15.03.02
Технологические машины и оборудование.

Практические работы предназначены для закрепления теоретического
материала и приобретения навыков использования холодильной техники в
пищевой промышленности. Учебно-методическое пособие содержит общие
требования к выполнению практических работ, их структуре и оформлению.

Табл. 12, рис. 28, список лит. – 14 наименований

Учебно-методическое пособие рассмотрено и рекомендовано в качестве
локального электронного методического материала кафедрой инжиниринга
технологического оборудования 28 октября 2025 г., протокол № 3

Учебно-методическое пособие рекомендовано в качестве локального
электронного методического материала к использованию в учебном процессе
методической комиссией института агроинженерии и пищевых систем ФГБОУ
ВО «Калининградский государственный технический университет» 30 октября
2025 г., протокол № 8

УДК 536.6

© Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Калининградский государственный
технический университет», 2025 г.
© Фролова Н. А., 2025 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Методические указания к проведению практических занятий.....	6
Практическая работа № 1. Изучение особенностей устройства и принципа действия холодильной установки.....	9
Практическая работа № 2. Построение и анализ циклов работы холодильных машин и установок.....	14
Практическая работа № 3. Изучение конструкции и испытание фреоновой холодильной установки.....	20
Практическая работа № 4. Изучение устройства холодильных компрессоров и определение параметров поршневого компрессора.....	27
Практическая работа № 5. Изучение конструкции воздухоохладителя и определение его коэффициента теплопередачи.....	40
Практическая работа № 6. Изучение конструкции воздушного конденсатора и определение его коэффициента теплопередачи.....	45
Практическая работа № 7. Изучение работы холодильной установки в регенеративном цикле. Изучение конструкции рекуперативного теплообменного аппарата.....	50
Практическая работа № 8. Изучение конструкции водяного конденсатора и определение его коэффициента теплопередачи.....	57
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	63
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	64
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Схема экспериментальной установки.....	64
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Таблица параметров измерения.....	65

ВВЕДЕНИЕ

Сохранение продовольственных продуктов в течение длительного времени и доведение их до потребителя в полноценном виде имеет особое значение, так как до 40 % производимой сельскохозяйственной продукции необходимо подвергать холодильной обработке в целях предотвращения ее порчи и сокращения потерь. Воздействие холода по сравнению с другими методами консервирования пищевых продуктов вызывает минимальное изменение их питательной ценности, вкуса, массы, товарности. Знание теоретических и практических основ получения низких температур искусственного холода, позволяющих выполнять расчеты для подбора холодильного оборудования и определения основных параметров процессов холодильного консервирования, позволит более качественно обрабатывать и сохранять продукты.

Холодильная техника – это отрасль науки, исследующая и разрабатывающая различные способы получения искусственного холода, а также технические средства получения и применения холода.

Холодильная технология продуктов питания – отрасль науки, которая изучает рациональные и научно обоснованные способы использования холода в пищевой промышленности, решает задачи сохранения сырья и продуктов питания с помощью холода и применения его в их производстве.

Холодильная техника и холодильная технология как наука базируются на знаниях из курсов термодинамики, механики, других наук физического цикла, биологии животных и растений, микробиологии, химии органических и неорганических соединений, биологической, коллоидной и физической химии.

Сам процесс охлаждения является сложным механизмом так как при прохождении через систему конденсатных трубок (конденсатор) газ сжижается и охлаждается. Затем он фильтруется и через капиллярную трубку поступает к испарителю (охлаждающая пластина), который установлен непосредственно за задней стенкой холодильника и распространяется в морозильную камеру. После попадания в испаритель сжиженный хладагент быстро расширяется, и при этом его температура резко падает, когда он снова превращается в газ при низком давлении. Поскольку система герметична, то этот процесс продолжается до тех пор, пока терморегулятор не отметит требуемую температуру внутри холодильника или морозильника, при которой он отключает компрессор.

Дисциплина «Холодильная техника в пищевой промышленности» относится к модулю направления ОПОП ВО по направлению подготовки 15.03.02 Технологические машины и оборудование.

Целью освоения дисциплины «Холодильная техника в пищевой промышленности» является формирование знаний, умений и навыков, необходимых для учёта требований к холодильной технологии и оборудованию, а также их характеристики при расчете и проектировании соответствующего технологического оборудования.

Целью учебно-методического пособия по изучению дисциплины практикума является применение в профессиональной деятельности

холодильной техники и(или) знаний холодильной технологии, проектирование и оснащение рабочих мест.

Задачи практикума: глубокое усвоение лекционного курса, развитие навыков самостоятельного исследования, а также овладение методикой построения и анализа циклов работы холодильных машин и установок.

Практические занятия способствуют получению умений и навыков для использования их в дальнейшей профессиональной деятельности.

После изучения курса и выполнения практических работ студент должен знать:

- основные процессы и принцип работы оборудования холодильных установок;

- методику расчета машин и аппаратов холодильных установок при заданных параметрах и тепловых нагрузках;

- основные понятия о теоретических и действительных термодинамических циклах работы холодильных установок, о теории тепло- и массообмена;

- методы проектирования систем с использованием холодильных установок;

уметь:

- пользоваться методическими и нормативными материалами, техническими условиями и стандартами при расчете и проектировании холодильных установок;

- выполнять расчеты машин и аппаратов холодильных установок при заданных параметрах и тепловых нагрузках для различных технологических и производственных процессов пищевых производств;

- представлять пути интенсификации процессов и совершенствования аппаратов холодильных установок;

владеть:

- способами интенсификации процессов и совершенствования аппаратов холодильных установок.

Методические указания к каждой практической работе включают теоретические сведения, описание хода работы на экспериментальной установке, контрольные вопросы.

Прежде чем приступить к выполнению работы, студенты должны изучить методические указания к ней, ознакомиться с ходом работы на экспериментальной установке, подготовить форму для записи в тетрадь, ответить на контрольные вопросы.

При необходимости для обучающихся инвалидов или обучающихся с ОВЗ предоставляется дополнительное время для подготовки ответа с учетом его индивидуальных психофизических особенностей.

Тематический план практических работ (ПР)

№ темы	Наименование темы ПР
1	Изучение особенностей устройства и принципа действия холодильной установки
2	Построение и анализ циклов работы холодильных машин и установок
3	Изучение конструкции и испытание фреоновой холодильной установки
4	Изучение устройства холодильных компрессоров и определение параметров поршневого компрессора
5	Изучение конструкции воздухоохладителя и определение его коэффициента теплопередачи
6	Изучение конструкции воздушного конденсатора и определение его коэффициента теплопередачи
7	Изучение работы холодильной установки в регенеративном цикле. Изучение конструкции рекуперативного теплообменного аппарата
8	Изучение конструкции водяного конденсатора и определение его коэффициента теплопередачи

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ПРОВЕДЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

До проведения практических работ на установках студенты обязательно должны пройти инструктаж по технике безопасности согласно инструкции, которая включает в себя следующие основные положения.

Общего назначения

Все работы на установках должны проводиться только в присутствии и при участии преподавателя или ответственного лица, прошедшего полный инструктаж по соблюдению правил техники безопасности.

Место, где размещена установка, запрещается загромождать посторонними предметами.

По электрической части

Ввиду наличия на установке высокого напряжения 220 В для питания электродвигателей, ТЭНов и контрольно-измерительных приборов запрещается:

- а) проникать за защитные ограждения присоединительных клемм;
- б) открывать распределительный щит и защитные кожухи установки;
- в) включать и отключать установку без разрешения преподавателя.

г) во избежание возможного поражения электрическим током, запрещается касаться при включенной установке одновременно питающих проводов измерительных приборов, оборудования и трубопроводов отопления, водопровода или заземляющего контура.

д) установка должна быть немедленно отключена, если обнаружено повреждение заземления, защитного ограждения и при внезапном прекращении подачи энергии.

При появлении дыма из электронагревателей, другого оборудования или пускорегулирующей аппаратуры, поломки или перегрева компрессора сверх допустимой температуры и при других аварийных ситуациях, немедленно отключить установку **аварийной кнопкой «Стоп»**, находящейся в правой части стенда и сообщить о случившемся преподавателю.

По эксплуатации установки

а) ввиду опасности отравления разложившимся фреоном запрещается применение открытого пламени и курение в помещении, где расположен экспериментальный стенд;

б) ввиду опасности разгерметизации стенда и последующего отравления и обмороживания кожи человека не подвергать сильным механическим воздействиям аппаратуру, коммуникации и другие элементы установок, в которых протекает хладагент, а также не трогать без необходимости баллоны, находящиеся в лаборатории.

В случае обнаружения значительной утечки хладагента следует предупредить преподавателя и немедленно включить вытяжную вентиляцию или открыть окна к двери и проветрить помещение.

Если произошло отравление хладагентом необходимо вынести пострадавшего на свежий воздух или в чистое теплое помещение. При попадании хладагента в глаза необходимо провести обильное промывание струей воды. При попадании жидкого хладагента на кожу, во избежание обморожения следует окунуть пораженную поверхность кожи в тёплую воду. При поражении электрическим током и при других экстренных ситуациях необходимо немедленно вызвать врача, а до его прибытия оказать пострадавшему первую медицинскую помощь.

По окончании работы установка должна быть отключена в строгом соответствии с указаниями, приведенными в данном методическом пособии.

Перед уходом студенты обязаны привести в порядок свое рабочее место и поставить в известность преподавателя об окончании работы.

В приложении А представлена принципиальная схема универсального экспериментального стенда ПАХП-ХМ-Р. Холодильная установка заправлена фреоном R404a.

Внимание! Перед первым пуском установки необходимо внимательно прочитать данный раздел, «Описание практических стендов». Проверить аварийная кнопка АК должна находиться в отжатом положении. Для этого повернуть её по часовой стрелке (направление стрелками указано на кнопке). Стенды спроектированы так, что, включая в работу отдельные элементы с

помощью запорных вентилей (ЗВ) на них можно испытать работу различных аппаратов холодильных машин, таких, как герметичный компрессор, пластинчатый испаритель или воздухоохладитель, водяной или воздушный конденсатор, пластинчатый теплообменный аппарат (в зависимости от исполнения стенда). Проводить испытания холодильной установки, работающей по простейшему, а также по регенеративному циклу. Экспериментальные работы по автоматике, настройке оптимальных режимов работы установки и составления электрической схемы.

Перечень практических работ представлен в оглавлении. В каждой работе есть раздел «Последовательность проведения работы», где описывается, какие необходимо сделать переключения для выполнения данной работы. При проведении каждой работы необходимо внимательно прочитать данный раздел.

Установка оснащена приборами автоматики, которые позволяют контролировать рабочие и аварийные режимы работы. Так на стенде ПАХП-ХМ-Р для контроля превышения давления конденсации установлено два аварийных реле давления. Первый с ручным возвратом, РД2 (зеленая клавиша на верхней панели прибора, надо отжать от себя для снятия ошибки), установлен на срабатывание $P = 21$ бар и второй, РД3, контрольный с автоматическим возвратом $P = 23$ бар.

На стороне всасывания установлено реле низкого давления (РД1), который позволяет с одной стороны контролировать давление всасывания, а с другой обеспечивает пуск компрессора без перегрузки в режиме «пуск-остановка».

С помощью запорных вентилей (ЗВ) можно обеспечить разные схемы работы установки и задействовать различные аппараты. Для получения корректных данных (средних значений) используемых в расчетах необходимо снимать показания с графиков. Для этого необходимо в программе MeasLAB в установившемся режиме перейти в окно графики, выбрать графическое изображение только тех температур, которые необходимы, сузить диапазон на экране компьютера до пределов измеряемых значений.

Установка включается с помощью автоматического выключателя, АВ. Лампочка Л указывает на наличие питания.

Холодильный агент в испаритель (И) может подаваться в ручном режиме с помощью регулирующего вентиля (РВ) (при этом запорный вентиль ЗВ1 необходимо закрыть), или в автоматическом с помощью терморегулирующего вентиля ТРВ2.

В случае остановки стенда на длительный период времени рекомендуется провести частичную консервацию установки: при работающей установке закрыть запорные вентили ЗВ3 и ЗВ4, «собрать» фреон в ресивере РЛ. после отключения компрессора по давлению всасывания закрыть запорные вентили ЗВ9 и ЗВ8 для ПАХП-ХМ-Р. На стенде ПАХП-ХМ-Р с помощью переключателя (кнопка «Воздухоохладитель-Испаритель») можно включить две основные схемы работы установки с помощью соответствующего соленоидного вентиля (СВ):

Первая, при включении 1СВ подключает к работе воздухоохладитель

(ВО), холодильный агент при этом будет подаваться в ВО с помощью терморегулирующего вентиля ТРВ1 в автоматическом режиме.

Вторая, при включении 2СВ подключает к работе жидкостной испаритель (И). При этом необходимо выключателем ВК5 включить насос, обеспечивающий циркуляцию теплоносителя через испаритель и ВК6 нагреватель НЭ. При этом будет обеспечиваться автоматическое поддержание температуры теплоносителя с помощью датчика (21) и регулятора температуры ТС. Запорный вентиль 3В2 должен быть открыт. Байпасный вентиль 3В11 закрыт.

С помощью регулятора температуры (РТ) можно установить требуемую температуру в холодильной камере. Регулятор скорости РС позволяет изменять расход воздуха, подаваемого на охлаждение в воздушный конденсатор (КД2).

С помощью выключателя ВК4 можно отключить вентилятор воздушного конденсатора, если он не задействован в данный момент времени. Для включения вентилятора необходимо также вывести регулятор РС из фиксирующего положения поворотом по часовой стрелке.

При переходе с воздушного конденсатора на конденсатор с водяным охлаждением необходимо полностью не закрыть вентиль 3В9 (открыт на 1/4 оборота) это позволит стабилизировать режим циркуляции холодильного агента и исключить его «залегания» в змеевике воздушного конденсатора.

При длительной работе воздухоохладителя на его поверхности может образовываться снеговая «шуба», для её удаления, в ручном режиме, можно включить ТЭН оттайки, кнопкой ВК2.

Кнопкой ВК3 включить вентилятор воздухоохладителя. ВК1 включение компрессора. **Внимание!** В контур циркуляции теплоносителя необходимо заливать только пропиленгликоль с температурой замерзания не выше минус 30 °С.

С помощью измерителя мощности можно замерить потребляемую мощность компрессора (КМ). Если в разделе «форма отчетности» указано «схема холодильной установки», то **чертить надо только те элементы, которые задействованы в данной работе.**

Практическая работа № 1. Изучение особенностей устройства и принципа действия холодильной установки

Цель работы: формирование практических умений и навыков по устройству, техническими характеристиками холодильной установки, особенностям работы и принципу действия холодильных установок.

Задачи работы:

1. Ознакомиться с возможными режимами работы холодильных установок.
2. Составить техническую характеристику холодильной установки.
3. Понять особенности обратных циклов работы холодильных установок.

Краткие теоретические сведения

В соответствии со вторым законом термодинамики непрерывное искусственное охлаждение (с помощью холодильных машин) не может происходить без затраты энергии. Совокупность процессов, которые протекают при этом, называют обратным круговым процессом или обратным термодинамическим циклом. В прямом термодинамическом цикле теплота переносится от горячего источника к холодному при этом совершается работа. В обратном цикле теплота, наоборот, переносится от холодного к источнику с более высокой температурой, при этом затрачивается работа.

Наиболее совершенным в термодинамическом отношении является цикл Карно (названный в честь французского ученого и инженера Сади Карно, который впервые его описал). Обратный цикл Карно – это круговой процесс, состоящий из двух адиабатических и двух изотермических процессов (проходящий против часовой стрелки, рисунок 1.1), является теоретическим и осуществляется с минимальной затратой работы при этом разность между источниками теплоты бесконечно мала.

В холодильных машинах (установках) рабочее вещество (хладагент) совершает обратный цикл за счет механической или другой энергии. Возможны три разновидности обратных циклов: холодильный, теплового насоса и комбинированный.

Холодильная машина, работающая по холодильному циклу, служит для охлаждения какой-либо среды или поддержания низкой температуры в охлаждаемом помещении при этом теплота от источника низкой температуры Тинт (охлаждаемого объекта) передается окружающей среде, t_0 .с. Такой обратный цикл показан на рисунке 1.1, а.

В процессе 4-1 к рабочему веществу от источника низкой температуры (низкопотенциального источника) подводится удельная теплота q_0 , за счет которой холодильный агент кипит при постоянной температуре t_0 и давлении p .

В Процессе 1-2 рабочее вещество сжимается в компрессоре с затратой энергии l_k , при этом происходит повышение давления от p_0 до p_k и соответственно температуры от t_0 до t_k . В процессе 2-3 происходит отвод тепла q_k от рабочего вещества к окружающей среде сопровождающийся конденсацией паров хладагента при постоянной температуре t_k и давлении p_k . Процесс 3-4 расширение рабочего вещества от давления p_k до p_0 и соответственно температуры от t_k до t_0 , с совершением работы p в расширительном цилиндр – детандере.

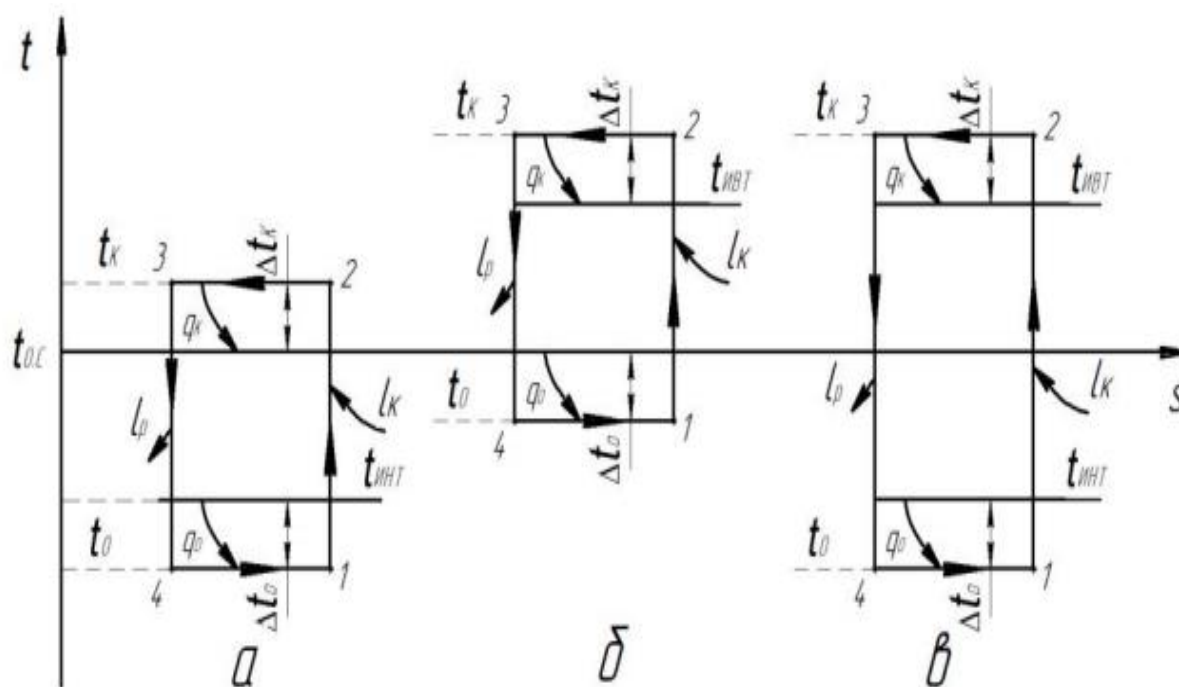


Рисунок 1.1 – Обратные циклы в t-s диаграмме:
а – холодильный; б – теплового насоса; в – комбинированный

Согласно второму закону термодинамики окружающей среде передается теплоты больше, чем отнимаем от источника низкой температуры, на величину работы цикла

$$q_k - q_0 = l_u. \quad (1.1)$$

Работа, которую необходимо затратить для осуществления обратного цикла, равна

$$l_u = l_k - l_p \quad (1.2)$$

Термодинамическая эффективность теоретического холодильного цикла характеризуется холодильным коэффициентом

$$\varepsilon_T = q_0 / l_u \quad (1.3)$$

Если холодильная машина работает по циклу теплового насоса, тогда теплота от окружающей среды передается источнику с более высокой температурой $T_{\text{ивт}}$. В этом случае холодильная машина используется для теплоснабжения. Цикл теплового насоса показан на рисунке 1.1, б. В процессе 4-1 к рабочему веществу подводится теплота от окружающей среды. При сжатии рабочего вещества (1-2) его температура повышается вследствие того, что работа, затраченная на повышение давления, переходит в тепло. В процессе 2-3 рабочее вещество отдает теплоту источнику высокой температуры – воде или воздуху, которые используются для отопления помещений или других технологических целей. В процессе 3-4 рабочее вещество расширяется, совершая при этом работу l_p .

Термодинамическая эффективность теоретического цикла теплового

насоса определяется отопительным коэффициентом

$$\mu^T = q_k / l_u \quad (1.4)$$

Комбинированный цикл – цикл холодильной машины, в котором теплота от источника низкой температуры передается источнику высокой температуры. Такой цикл представлен на рисунке 1.1, в, где 4-1 – это процесс подведения теплоты q_k к рабочему веществу, 1-2 – сжатие рабочего вещества, 2-3 – отвод теплоты q_k от рабочего вещества к источнику высокой температуры, 3-4 – расширения рабочего вещества с получением работы.

При помощи комбинированного цикла получают одновременно холод и теплоту которые могут использоваться в технологических процессах, например, при первичной обработке молока, пастеризации и последующего охлаждения.

В действительных холодильных машинах процесс расширения в детандере с получением внешней работы / заменяют процессом дросселирования, это связано с тем, что в паровых холодильных машинах работа, получаемая (возвращаемая) в детандере мала, по сравнению с работой компрессора и для упрощения схемы и сокращения затрат на изготовление холодильной машины (детандеры по устройству сопоставимы с компрессором) детандеры заменяют дросселем, а процесс расширения соответственно дросселированием.

Тогда

$$l_u = l_k = 1 \quad (1.5)$$

Дросселированием называют эффект падения давления рабочего вещества в процессе протекания его через сужение в канале. Физическое падение давления в процессе дросселирования обусловлено диссипацией энергии потока, расходуемой на преодоление местного сопротивления. Таким местным сопротивлением может быть диафрагма, вентиль или капиллярная трубка.

Как видно из рассмотренных циклов работы холодильных машин все процессы и соответственно оборудование будет одинаковое. Отличие только в источниках температуры участвующих в теплообмене.

Основными элементами паровых холодильных машин являются: компрессор, конденсатор, испаритель и устройство для дросселирования холодильного агента, в качестве которого в данной установке используется терморегулирующий вентиль (ТРВ). Для безопасной, надежной и эффективной работы установки в схему включают вспомогательные элементы: отделители жидкости, ресиверы, фильтры-осушители, смотровые стекла, запорные и регулирующие вентили, устройства и приборы автоматической защиты и регулирования, рекуперативный теплообменник и др. Все элементы соединяются между собой, по схеме, трубопроводами.

Таблица 1.1 – Основные характеристики холодильного оборудования

Оборудование	Основные параметры	Значение	Единицы измерения
Компрессор	Марка		
	Тип		
	Производительность, Q_0		кВт
Конденсатор	Марка		
	Тип		
	Площадь поверхности, F		m^2
Испаритель	Марка		
	Тип		
	Площадь поверхности, F		m^2
Терморегулирующий вентиль, TRV	Марка		
Отделитель жидкостей	Марка		
	Внутренний объем, V		л
Ресивер	Марка		
	Внутренний объем, V		л
Рекуперативный теплообменный аппарат	Марка		
	Тип		
	Площадь поверхности, F		m^2
Фильтр осушитель	Марка		
Соленоидный вентиль	Марка		
Смотровое стекло	Марка		

Последовательность выполнения работы

В работе будут задействованы следующие основные устройства: компрессор (КМ), жидкостной испаритель (И), воздушный конденсатор (КД2), соленоидный вентиль 2СВ, рекуперативный теплообменник (ТО), терморегулирующий вентиль (ТРВ2), нагреватель электрический (НЭ), насос (Н) (приложение А).

1. Подготовить установку к испытаниям. Удостовериться, что уровень теплоносителя наблюдается в заливочном устройстве (У) не ниже его середины, в противном случае долить жидкость в систему. Подтеки не допускаются.

2. Подключить стенд к сети 220 В.

3. Подключить автоматизированный стенд к USB разьему компьютера.

5. Открыть вентили 3В1, 3В2, 3В4, 3В6, 3В9.

4. Закрыть РВ, 3В3, 3В5, 3В8, 3В10, 3В11.

5. Проверить переключатель (кнопка «Воздухоохладитель-Испаритель») должна находиться в положении «Испаритель». ВК4 – включен, регулятор скорости РС установить на max, ВК2, ВК3 – выключены.

6. Выставить температуру теплоносителя с помощью ТС, $t_l = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$.
7. Включить холодильную установку однополюсным QF1, «сеть».
8. Запустить программу Пуск Программы → MeasLAB Explorer.
9. Включить ВК5- насос, ВК6 - нагреватель и затем ВК1-компрессор.
10. При включении компьютерной системы измерения клавишей «Старт» в программе на цифровых индикаторах лицевой панели отображаются мгновенные значения температур, измеряемых всеми датчиками, и графики их изменения по времени.

Обработка результатов

После снятия замеров кнопку «Воздухоохладитель-Испаритель» перевести в среднее положение, подождать отключения компрессора, по давлению всасывания, выключить АВ «Сеть 220 В».

Контрольные вопросы

1. Характеристика принципа работы холодильной машины по циклу теплового насоса.
2. Особенность работы холодильной машины в цикле охлаждения.
3. Особенность работы холодильной машины в комбинированном цикле.
4. Дать характеристику отопительному коэффициенту и теоретический холодильный коэффициент.
6. Процесс замены расширительного цилиндра в холодильных установках.
7. Роль регулирующего вентиля в холодильных установках.

Практическая работа № 2. Построение и анализ циклов работы холодильных машин и установок

Цель работы: формирование практических умений и навыков по закреплению теоретических знаний основ термодинамических циклов, анализа работы холодильной установки и построение цикла её работы в заданном режиме.

Задачи работы

1. Провести испытания холодильной машины.
2. Исследовать циклы работы фреоновой холодильной машины.
3. Провести анализ возможных циклов работы холодильной установки и определить теоретический холодильный коэффициент.

Краткие теоретические сведения

При рассмотрении условий перехода теплоты от источника с низкой температурой к источнику с более высокой температурой необходимо обратиться к понятию обратимости циклов.

Процесс называется обратимым, если после его завершения все участвующие в нём источники (объекты) могут быть возвращены в

первоначальное состояние. Процессы, которые не удовлетворяют этим условиям, называются необратимыми.

Циклы холодильных машин являются необратимыми, так как при их осуществлении возникает внутреннее трение частиц рабочего вещества (холодильного агента) между собой, трение в аппаратах и трубопроводах, дросселирование, а также передача теплоты, происходящая при конечной разности температур, и другие факторы. От того, как совершается цикл, зависит эффективность работы холодильной машины. Задача термодинамического анализа, основанного на первом и втором законах термодинамики, состоит в том, чтобы выяснить предельно возможную эффективность циклов холодильных машин и указать на те элементы, улучшение которых способно наиболее значительно повлиять на рост общей эффективности.

Холодильные машины могут работать по простейшему циклу, циклу с переохлаждением и по регенеративному циклу. Рассмотрим их подробнее и проведём анализ их эффективности.

Регенеративный цикл холодильной машины можно изобразить в диаграммах $T-s$ (рисунок 2.1) и $\lg p-i$ (рисунок 2.2) контуром 1-2-2'-3'-3-4-a-1, который состоит из процессов:

1-2 адиабатическое сжатие холодильного агента в компрессоре до давления, соответствующего температуре конденсации;

2-3' отвод теплоты от рабочего тела в окружающую среду в конденсаторе при постоянном давлении. Этот процесс включает в себя этап 2-2' – охлаждение перегретого пара от температуры конца сжатия до температуры конденсации (снятие перегрева) и этап 2'-3' – процесс конденсации паров холодильного агента при постоянной температуре;

3'-3 переохлаждение жидкого холодильного агента ниже температуры конденсации;

3-4 процесс дросселирования переохлажденного жидкого холодильного агента в регулирующем вентиле;

4-a кипение холодильного агента в испарителе при постоянной температуре и давлении за счёт отвода тепла от объекта охлаждения;

a-1 перегрев паров холодильного агента до температуры начала сжатия.

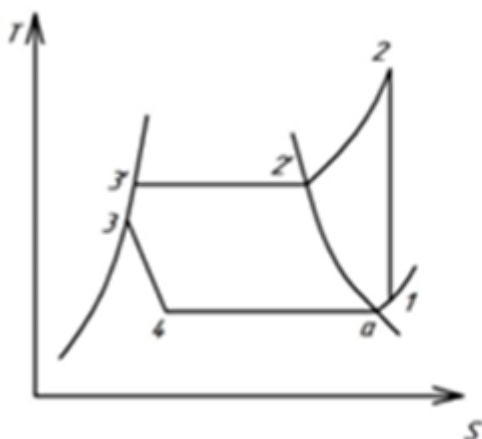


Рисунок 2.1 – $T-s$ диаграмма

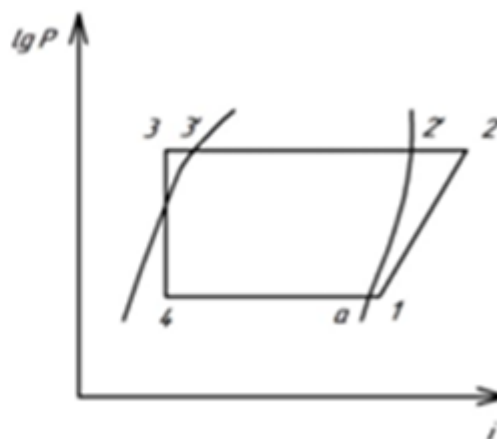


Рисунок 2.2 – $\lg p-i$ диаграмма

Рассмотрим некоторые особенности действительного регенеративного цикла, отличающего его от обратного цикла Карно:

1. Расширительный цилиндр (детандер) заменён регулирующим вентилем. Это связано с тем, что из-за малого удельного объёма жидкого холодильного агента, поступающего в детандер, его размеры были бы незначительными, что затрудняет конструирование и изготовление. Кроме того, работа, получаемая при адиабатном расширении жидкости, для распространённых хладагентов мала, а механические потери в детандере поглощают значительную часть этой работы. Поэтому детандеры в паровых холодильных машинах не применяются и заменяются регулирующим вентилем, в качестве которого используются терморегулирующий вентиль или капиллярные трубки – простые по своему устройству.

2. Жидкость перед регулирующим вентилем (РВ) переохлаждается до температуры переохлаждения $t_{\text{пер}}$. В результате переохлаждения энтальпия жидкого хладагента перед РВ уменьшается. Это, в свою очередь, снижает бесполезное парообразование в процессе дросселирования и, следовательно, без дополнительных затрат работы увеличивает холодопроизводительность установки.

3. Компрессор вместо влажного пара всасывает перегретый пар, что значительно уменьшает вероятность работы установки на влажном ходу и, соответственно, исключает возможность возникновения гидравлического удара.

В теоретическом цикле паровой холодильной машины компрессор должен работать на влажном ходу, то есть всасывать влажный пар и сжимать его до состояния сухого насыщенного пара. Теоретически такой режим работы наиболее выгоден, так как позволяет осуществить цикл, приближающийся к обратному циклу Карно. Однако в реальных холодильных установках работа компрессора на влажном ходу приводит к тому, что в мертвом пространстве остаются капельки жидкости. При обратном ходе поршня эти капельки испаряются, образовавшийся пар занимает часть объёма цилиндра и, соответственно, уменьшает количество всасываемого свежего пара. В результате снижается коэффициент подачи, возрастает действительная работа, затрачиваемая на привод компрессора, и, соответственно, уменьшается холодильный коэффициент. Кроме того, значительное попадание жидкого хладагента в цилиндры компрессора может привести к гидравлическому удару, поскольку жидкость практически несжимаема.

Последовательность выполнения работы

В работе будут задействованы следующие основные устройства: компрессор (КМ), жидкостной испаритель (И), воздушный конденсатор (КД2), соленоидный вентиль (2СВ), рекуперативный теплообменник (ТО) в регенеративном цикле, ручной регулирующий вентиль (РВ), нагреватель электрический (НЭ), насос (Н).

1. Подготовить установку к испытаниям. Удостовериться, что уровень теплоносителя в заливочном устройстве (У) находится не ниже его середины; в противном случае долить жидкость в систему. Подтеки не допускаются.
2. Подключить стенд к сети 220 В.
3. Подключить автоматизированный стенд к USB-разъему компьютера.
4. Открыть вентили 3В2, 3В3, 3В5, 3В9.
5. Закрыть РВ, 3В1, 3В4, 3В6, 3В8, 3В10, 3В11.
6. Проверить положение переключателя (кнопка «Воздухоохладитель-Испаритель») – он должен находиться в положении «Испаритель». ВК4 – включен, регулятор скорости (РС) установить на максимум, ВК2, ВК3 – выключены.
7. Включить холодильную установку однополюсным автоматическим выключателем (АВ) «Сеть».
8. Запустить программу: Пуск → Программы → MeasLAB Explorer.
9. Включить ВК5 – насос, ВК6 – нагреватель, а затем ВК1 – компрессор.
10. При запуске компьютерной системы измерения нажатием кнопки «Старт» в программе на цифровых индикаторах лицевой панели отображаются мгновенные значения температур, измеряемых всеми датчиками, и графики их изменения во времени.
11. Очень медленно открывая регулирующий вентиль (РВ) подачи жидкого холодильного агента в испаритель (И), добиться установления давления кипения $p_0 = 340.2$ кПа (по манометру РП). При этом не допускать переполнения испарителя и обмерзания всасывающего трубопровода, поддерживая положительную температуру на всасывании в компрессор твс, контролируя показания датчика температуры 8.
12. Регулятором температуры (РС), изменяя частоту вращения крыльчатки вентилятора конденсатора КД2, добиться установления давления конденсации в пределах $p_k = 1941$ кПа (по манометру РП2).
13. При установившемся режиме снять показания приборов согласно таблицы 1.2 (Простейший цикл, без переохлаждения и перегрева хладагента), режим № 1.
14. Открыть вентили 3В4, 3В6.
15. Закрыть 3В3, 3В5.
16. Регулируя работу установки, как в п. 11 и 12, добиться примерно таких же давлений p_0 и p_k . При установившемся режиме снять показания приборов согласно таблицы 1.3 (Регенеративный цикл с переохлаждением и перегревом холодильного агента в теплообменнике ТО), режим № 2.
17. После снятия замеров перевести кнопку «Воздухоохладитель-Испаритель» в среднее положение, подождать отключения компрессора по давлению всасывания, выключить QF1 «Сеть 220 В».

Обработка результатов

1. По результатам опыта (режим № 2) построить регенеративный цикл работы холодильной машины (1-2-3-4-1) в диаграмме i -lgp для хладагента R404a (см. приложение) и рисунка 2.3.

2. Для термодинамического анализа циклов исследуемой холодильной машины одновременно построить обратный цикл Карно (1'-2'-3'-4'-1') и цикл без переохлаждения (режим №1) жидкости перед РВ и перегрева пара в теплообменнике (1''-2''-3''-4''-1'').

3. По диаграмме для хладагента R404a определить энтальпии узловых точек и записать полученные данные в таблицах 2.1 и 2.2.

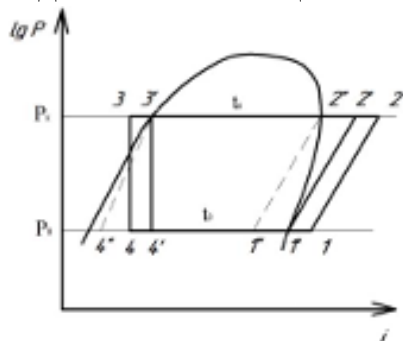


Рисунок 2.3 – Обратный цикл Карно, простейший, с переохлаждением и регенеративный

Для простейшего цикла определить:

4. Удельную массовую холодопроизводительность, то есть количество тепла, отводимое 1 кг рабочего вещества от охлаждаемого объекта:

$$q_0 = i_{1'} - i_{4'} \quad (2.1)$$

5. Удельную работу сжатия:

$$i = i_{2'} - i_{1'} \quad (2.2)$$

6. Определить количество теплоты, отдаваемое 1 кг холодильного агента в окружающую среду в конденсаторе:

$$q_k = i_{2'} - i_{3'} \quad (2.3)$$

7. Проверить сходимость баланса цикла:

$$q_k = q_0 + l \quad (2.4)$$

8. Вычислить теоретический холодильный коэффициент цикла:

$$E = \frac{q_0}{l} = \frac{i_{1'} - i_{4'}}{i_{2'} - i_{1'}} \quad (2.5)$$

9. Провести расчеты для регенеративного и обратного цикла Карно (п. 4–8, рисунок 2.3), при этом:

Для регенеративного цикла:

$$E = \frac{q_0}{l} = \frac{i_{1'} - i_{4'}}{i_{2'} - i_{1'}} \quad (2.6)$$

Для обратного цикла Карно:

$$E = \frac{q_0}{l} = \frac{i_{1''} - i_{4''}}{i_{2''} - i_{1''}} \quad (2.7)$$

Получения значения занести в таблицу 2.3

Таблица 2.1 – Простейший цикл режим № 1

Точка замера	t, °C	p, МПа	i, кДж/кг
На всасывании компрессор, t _{вс}			
В конце сжатия, t _п			
Перед регулирующим вентилем, t _п			
В испарителе, t _о (по манометру P1)			
В конденсаторе, t _к (по манометру P2)			

Таблица 2.2 – Регенеративный цикл, режим № 2

Точка замера	t, °C	p, МПа	i, кДж/кг
На всасывании компрессор, t _{вс}			
В конце сжатия, t _п			
Перед регулирующим вентилем, t _п			
В испарителе, t _о (по манометру P1)			
В конденсаторе, t _к (по манометру P2)			

Таблица 2.3 – Обобщенная таблица результатов

Циклы	q ₀ , кДж/кг	l, кДж/кг	q _к , кДж/кг	E	Выводы
Регенеративный цикл					
Цикл Карно					
Простейший цикл					

Контрольные вопросы

1. Отличия действительных циклов работы холодильных машин от цикла Карно.
2. Дать определение холодильного коэффициента.
3. Объяснить особенности регенеративного цикла работы паровой холодильной машины.
4. Сущность процесса увеличения холодильного коэффициента при работе холодильной машины с переохлаждением жидкого холодильного агента.
5. Причины применения расширительного цилиндра в холодильных машинах.
6. Механизм переохлаждения холодильного агента.

Практическая работа № 3. Изучение конструкции и испытание фреоновой холодильной установки

Цель работы: формирование практических умений и навыков анализа изменения температуры в камере охлаждения и проведения теплового расчета холодильной машины.

Задачи работы

1. Измерение рабочих параметров холодильной машины в установившемся режиме.
2. Анализ изменения температуры в камере охлаждения.
3. Расчет основных параметров работы холодильной установки.
4. Исследование влияния теплоизоляции на рабочие и энергетические параметры работы установки.

Краткие теоретические сведения

Холодильная машина состоит из компрессора КМ, воздушного конденсатора КД, фильтра-осушителя ФО, регулирующего вентиля (в данной установке терморегулирующего вентиля ТРВ) и воздухоохладителя ВО, выполняющего функции испарителя, соединенных трубопроводами (рисунок 1, приложение А). Компрессор является основной частью холодильной машины. Для поддержания в испарителе заданной температуры кипения необходимо чтобы давление в нем соответствовало этой температуре, для этого компрессор должен отсасывать все пары, образующиеся в испарителе.

Рассмотрим принцип работы холодильной установки. В испарителе, (воздухоохладителе) при температуре t_0 и давлении p_0 жидкий холодильный агент кипит за счет отвода тепла, поступающего в камеру. Пары хладагента, образующиеся в результате кипения, отсасываются компрессором КМ, сжимаются в нем до давления конденсации p_k и нагнетаются в конденсатор КД. Здесь пары охлаждаются до температуры конденсации и конденсируются при постоянной температуре k и давлении p_k конденсации, отдавая тепло воздуху. Из конденсатора жидкий холодильный агент поступает в регулирующий вентиль ТРВ, где происходит понижение давления от p_k до p_0 и

соответственно температуры от t_k до t_o . Затем холодильный агент поступает в испаритель и цикл повторяется.

Для проведения расчетов все процессы строятся в соответствующей диаграмме. В холодильной технике обычно используют тепловые диаграммы в координатах $T-s$ или $\lg p-i$ (рисунки 3.1, 3.2).

Рассмотрим основные процессы цикла при работе холодильной установки.

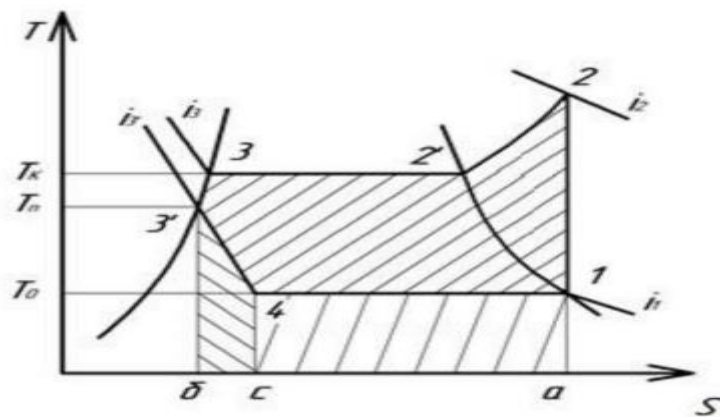


Рисунок 3.1 – Цикл одноступенчатого сжатия в $T-s$ диаграмме

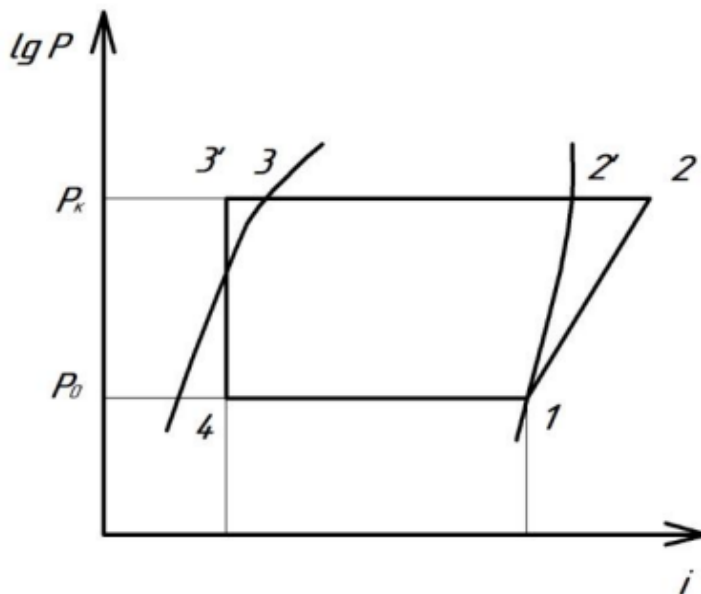


Рисунок 3.2 – Цикл одноступенчатого сжатия в $\lg p-i$ диаграмме

Отрезок 4-1 соответствует процессу кипения холодильного агента в испарителе при температуре t_o и давлении p_o , в результате которого происходит отвод удельного тепла q_o от охлаждаемой среды.

Отрезок 1-2 характеризует адиабатическое сжатие паров от давления кипения p_o до давления конденсации p_k , сопровождающийся повышением температуры. Этот процесс происходит с затратой удельной работы сжатия – l .

Отрезок 2-3 характеризует отвод удельного тепла конденсации – q_k , при

постоянном давлении p_k в конденсаторе, при этом необходимо отметить, что процесс состоит из отрезка 2-2 – снятия перегрева – охлаждения паров до температуры конденсации и 2-3 – непосредственно конденсации паров. В дальнейшем, так принято, говорится о процессе конденсации как едином процессе 2-3. Отрезок 3-3' – переохлаждение жидкого холодильного агента до температуры, определяемой точкой 3.

Отрезок 3-4 соответствует дросселированию холодильного агента, т. е. понижению давления от p_k до p . Это происходит без теплообмена с окружающей средой, поэтому выделившееся при дросселировании тепло приводит к частичному испарению холодильного агента при прохождении через регулирующий вентиль. Величина парообразования зависит от свойств холодильного агента и его температуры до регулирующего вентиля.

Образование паров в регулирующем вентиле приводит к уменьшению удельной холодопроизводительности, так как в испаритель будет поступать жидкость вместе с парами. Это и есть необратимые потери, которые повторяются при каждом цикле. Следовательно, переохлаждение жидкого холодильного агента после конденсатора до более низкой температуры позволит уменьшить необратимые потери, возникающие при дросселировании.

При проведении практических расчетов по холодильным машинам и установкам используют тепловые диаграммы в координатах $\lg p - i$ (рисунок 3.2), в которых подведенное и отведенное удельное тепло при постоянном давлении в испарителе и конденсаторе, а также удельная работа компрессора при адиабатическом сжатии определяются по разности теплосодержаний в начале и конце процесса. Количество тепла, подведенного к 1 кг холодильного агента в испарителе, или массовая удельная холодопроизводительность равна:

$$q_0 = i_1 - i_4, \text{ кДж/кг} \quad (3.1)$$

Удельное количество тепла, отведенное в конденсаторе,

$$q_k = i_2 - i_3, \text{ кДж/кг} \quad (3.2)$$

Удельная работа сжатия, затраченная в компрессоре,

$$I = i_1 - i_2, \text{ кДж/кг} \quad (3.3)$$

В процессе дросселирования теплосодержание жидкости не изменяется $i_3 = i_4$

Холодопроизводительность установки можно определить по уравнению

$$Q_0 = V_h \cdot \lambda \cdot q_v, \quad (3.4)$$

где V_h – объем, описываемый поршнем компрессора ($V_h = 4,3 \cdot 10^4 \text{ м}^3/\text{с}$); q_v – удельная объемная холодопроизводительность, определяется как

$$q_v = \frac{q_0}{v_1} \quad (3.5)$$

v_1 – удельный объем паров, всасываемых в компрессор, $\text{м}^3/\text{кг}$,

λ – коэффициента подачи компрессора можно определить по графику для однотипного компрессора, рисунок 4.9.

В данной практической работе имитируется работа холодильного шкафа. Рассматривая устройство и принцип работы холодильного шкафа можно

отметить следующие особенности: холодильные машины бытовых холодильников и торговых шкафов состоят из компрессора, конденсатора, ресивера, регулирующего органа, фильтра-осушителя, испарителя и трубопроводов.

Холодильная шкафа представляет собой теплоизолированный корпус, внутри которого располагается охлаждающие приборы (воздухоохладитель или батарея). В нижней или верхней части холодильного шкафа находится отсек, где устанавливается холодильный агрегат, включающий в себя: компрессор, конденсатор, ресивер и фильтр-осушитель.

Компрессоры – поршневые, герметичные, не прямоточные. Монтируются на одном валу с приводящим их электродвигателем и герметичном кожухе. В качестве холодильного агента используют фреон. Кожух компрессора подвешивается на пружинах, или устанавливается на виброизолирующих резиновых прокладках.

Конденсаторы – воздушного охлаждения со свободным или вынужденным движением воздуха. Конструктивно выполняются в виде ребристо-трубчатого аппарата с пластинчатыми или проволочными ребрами.

Фильтры изготавливаются из мелких сеток из латуни или нержавеющей стали, или из пористой металлокерамики. Служат для предохранения капиллярной трубки или терморегулирующего вентиля от засорения.

Осушители заполняются синтетическим цеолитом и служат для удаления из фреона воды. В малых установках их совмещают и устанавливают фильтры-осушители.

Испарители изготавливаются в виде коробчатой конструкции (теплообменная секция помещается в корпус и снабжается вентилятором (воздухоохладитель) или охлаждающей панели. Могут выполняться листотрубными, свариваемые из двух листов алюминия или нержавеющей стали, а также трубчатыми с пластинчатым оребрением.

Все части агрегата монтируются на общей раме. Элементы агрегата соединяются трубопроводами с помощью пайки или специальных резьбовых соединений. Температура воздуха регулируется с помощью регулятора температуры (термореле), которое дает команду на пуск или остановку электродвигателя компрессора непосредственно или через соленоидный вентиль и реле низкого давления, как в данной установке.

Последовательность выполнения работы

В работе будут задействованы следующие основные устройства: компрессор (КМ), воздухоохладитель (ВО), воздушный конденсатор (КД2), соленоидный вентиль (1СВ), терморегулирующий вентиль (ТРВ1), рекуперативный теплообменник (ТО).

1. Ознакомиться со схемой экспериментальной установки и расположением приборов (рисунок 1, приложение А). Составить описание и заготовить таблицы для регистрации результатов испытаний.

2. Подключить стенд к сети 220 В.

3. Подключить автоматизированный стенд к USB разъему компьютера.
 4. Открыть вентили 3B4, 3B6, 3B9.
 5. Закрыть РВ, 3B1, 3B3, 3B5, 3B8, 3B10, 3B11.
 6. Проверить переключатель (кнопка «Воздухоохладитель-Испаритель») должна находиться в положении – «Воздухоохладитель». ВК4 – включен, регулятор скорости РС установить на max, ВК5 и ВК6- выключены.
 7. Выставить температуру в камере $t_{\text{хк}} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, с помощью терморегулятора РТ.
 8. Включить холодильную установку однополюсным QF1 «Сеть 220 В».
 9. Включить ВК1 компрессор и ВК3 воздухоохладитель. ВК2 должен быть выключен.
 10. Запустить программу Пуск→Программы → MeasLAB Explorer.
 11. При включении компьютерной системы измерения клавишей «Старт» в программе на цифровых индикаторах лицевой панели отображаются мгновенные значения температур, измеряемых всеми датчиками, и графики их изменения по времени.
 12. При установившемся режиме в программе MeasLAB перейти в окно графики, выбрать графическое изображение только температур t_k ; t_o ; $t_{\text{хк}}$, сузить диапазон на экране компьютера до пределов измеряемых значений, и после снятия 2-3 циклов скопировать график и распечатать для последующего анализа (или снимать показания приборов через каждые 30 с и занести их в таблицу 3.1, режим No1 (Учитывая, что температура в конденсаторе $E_{\text{конд}} = t_k$, а температура в испарителе $t_{\text{исп}} = t_o$).
 13. Выставить температуру в камере $t_{\text{хк}} = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и при установившемся режиме выполнить п. 11
 14. Установить переднюю панель теплоизоляции и повторить опыты, п. 7, 11,12, режимы No3,4.
 15. После снятия замеров кнопку «Воздухоохладитель-Испаритель» перевести в среднее положение, подождать отключения компрессора, по давлению всасывания, выключить QF1 «Сеть 220 В».
- Примечание: температуры в камере можно устанавливать и другие, по указанию преподавателя, проводящего экспериментальную работу.

Обработка результатов

Расчет действительных циклов работы установки при $t_o = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $t_o = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ проводить для периода времени перед отключением СВ по замеренным давлениям конденсации и кипения и с учетом возможного перегрева и переохлаждения холодильного агента.

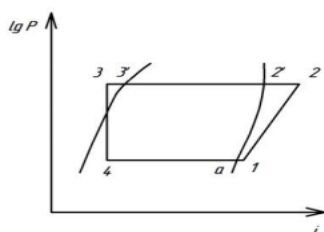


Рисунок 3.3 – Действительный цикл

Построить цикл работы холодильной машины в диаграмме $\lg p-i$ для R404a, (рисунок 3.3) и занести значения узловых точек в таблицу 3.1, 3.2.

Рассчитать:

1. Удельную холодопроизводительность, кДж/кг;

$$q_0 = i_a - i_4,$$

2. Удельную работу сжатия, затраченную в компрессоре, кДж/кг;

$$l = i_2 - i_1,$$

3. Холодильный коэффициент теоретического цикла;

$$\varepsilon = q_0 / l,$$

4. Средний коэффициент рабочего времени;

$$b = \tau_{\text{раб}} / \tau_{\text{тц}},$$

где $\tau_{\text{раб}}$ – суммарное время работы компрессора в заданном режиме;

$\tau_{\text{тц}} = \tau_{\text{раб}} + \tau_{\text{ст}}$ – время испытания в заданном режиме;

$\tau_{\text{ст}}$ – суммарное время стоянки компрессора.

5. Построить графики изменения температуры в холодильной камере $1_{\text{хк}}$, температуры в испарителе Тисп (t_o) и в конденсаторе (конд (t_k) во времени, (рисунок 3.4).

Определить холодопроизводительность установки по формуле 3.4.

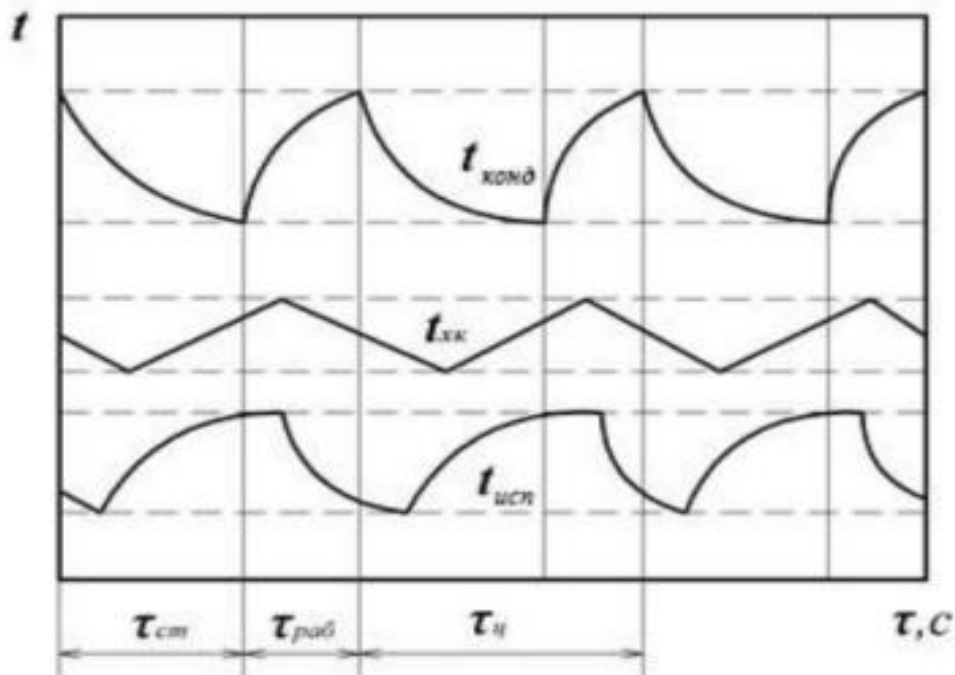


Рисунок 3.4 – График изменения рабочих температур

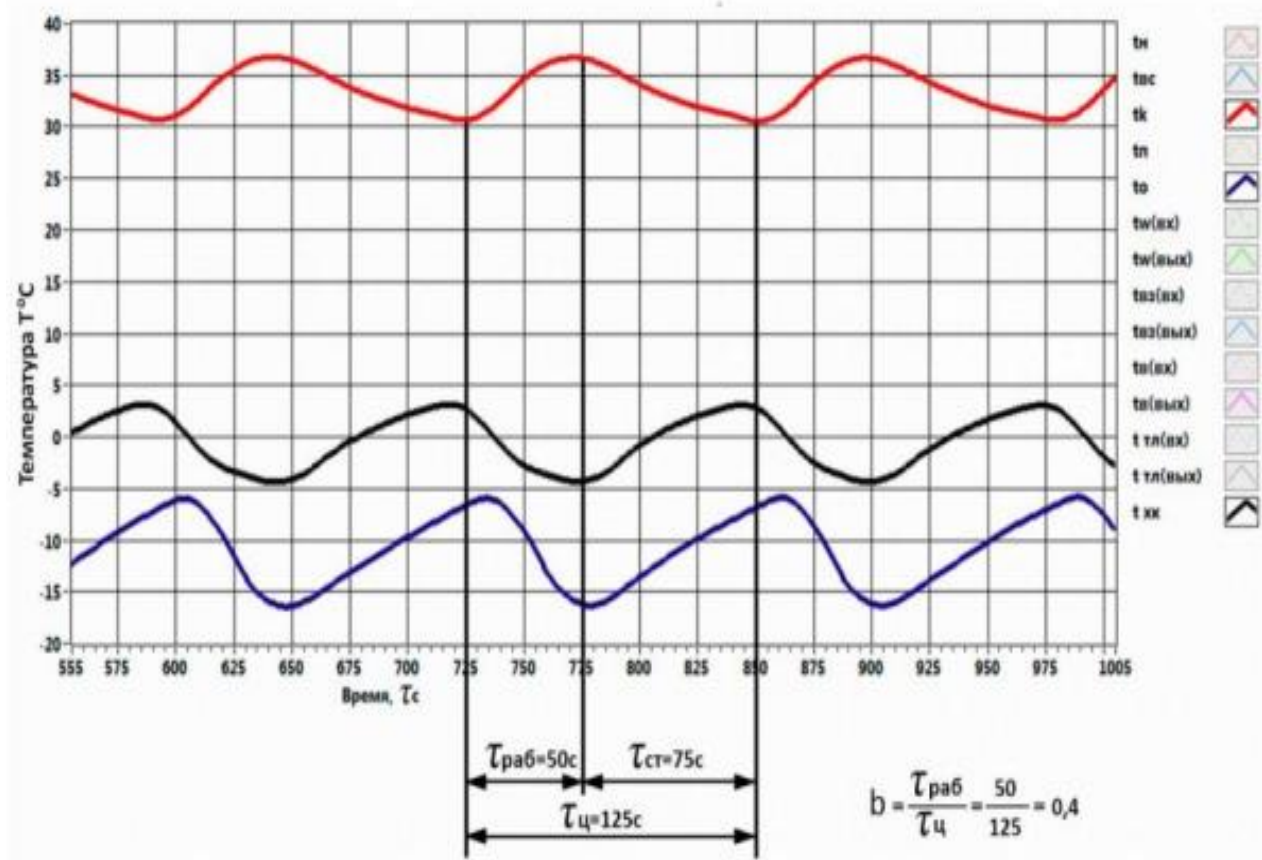


Рисунок 3.5 – График изменения рабочих температур с анализом режима работы

Таблица 3.1 – Протокол испытаний

№	t, °C	P, МПа	i, КДж/кг	v, м³/кг
1				
2				
3				
3				
4				

Таблица 3.2 – Протокол испытаний

№ п/п	Измеряемые величины									Определяемые величины			
	P ₀ , бар	P _к , бар	τ _{раб} , с	τ _{ст} , с	t ₀ ', °C	t _к ', °C	t _{вс} , °C	t _п ', °C	t _{жк} , °C	λ	Q ₀ , кВт	ε	b
Режим № 1 τ=30 с τ=60 с τ=90 с													
Режим													

№ п/п	Измеряемые величины									Определяемые величины			
	P_0 , бар	P_k , бар	$\tau_{\text{раб}}$, с	$\tau_{\text{ст}}$, с	t_0' , $^{\circ}\text{C}$	t_k' , $^{\circ}\text{C}$	t_{BC} , $^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{п}}'$, $^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{жк}}$, $^{\circ}\text{C}$	λ	Q_0 , кВт	ε	b
№ 2 $\tau=30$ с $\tau=60$ с $\tau=90$ с													
Режим № 3 $\tau=30$ с $\tau=60$ с $\tau=90$ с													
Режим № 3 $\tau=30$ с $\tau=60$ с $\tau=90$ с													
Режим № 4 $\tau=30$ с $\tau=60$ с $\tau=90$ с													

Контрольные вопросы

1. Устройство холодильного шкафа.
2. Процесс регулирования температуры.
3. Характеристика коэффициента рабочего времени.
4. Зависимость параметров зависит коэффициент подачи.
5. Как рассчитывается холодопроизводительность компрессора.
6. Влияние теплоизоляции на изменение температуры в камере и режим работы холодильной установки,
7. Конструктивные особенности холодильная машина. Устройство и назначение отдельных узлов.
8. Характеристика холодильного коэффициента.

Практическая работа № 4. Изучение устройства холодильных компрессоров и определение параметров поршневого компрессора

Цель работы: формирование практических умений и навыков по конструированию холодильных компрессоров и тепловому расчету поршневого компрессора.

Задачи работы

1. Изучить основные типы холодильных компрессоров и их классификацию.
2. Изучить основные узлы поршневого компрессора и принцип его работы.
3. Дать эскизную проработку заданного преподавателем узла со спецификацией.
4. Рассчитать рабочую холодопроизводительность и мощность электродвигателя компрессора.
5. Снять параметры рабочего режима и сравнить действительную электрическую мощность, потребляемую компрессором, с расчетной.

Краткие теоретические сведения

По принципу действия компрессоры делятся на два класса (рисунок 4.1):

- **Объемного принципа действия.** Рабочие органы машин этого класса всасывают определенный объем рабочего вещества, сжимают его благодаря замкнутому объему и затем нагнетают в камеру нагнетания. Эти машины дискретного принципа действия, рабочие процессы в которых совершаются строго последовательно, повторяясь циклически.

- **Динамического принципа действия,** в которых рабочее вещество непрерывно перемещается через проточную часть компрессора, при этом кинетическая энергия потока преобразуется в потенциальную.

Важной особенностью компрессоров объемного принципа действия является возможность их работы на любых хладагентах без изменения конструкций. Эти компрессоры работают, как правило, при наличии масла в рабочем пространстве. Важной особенностью компрессоров динамического принципа действия является необходимость полного отсутствия масла в рабочем пространстве.

Наибольшее распространение получили поршневые компрессоры, которые делятся по расположению цилиндров: на горизонтальные, вертикальные, угловые, V, W и VV-образные, радиальные. По способу прохождения пара через цилиндры: на прямоточные с движением пара в одном направлении в течение всего процесса и не прямоточные соответственно. По количеству цилиндров: на одно- и многоцилиндровые (до 12 цилиндров). По количеству ступеней сжатия: на одно- и многоступенчатые.

По степени герметичности и количеству разъемов различают:

- Герметичные со встроенным электродвигателем в заваренном корпусе без разъемов.
- Бессальниковые со встроенным двигателем, но с разъемными крышками.
- Сальниковые с картером.

Компрессоры – Классификация

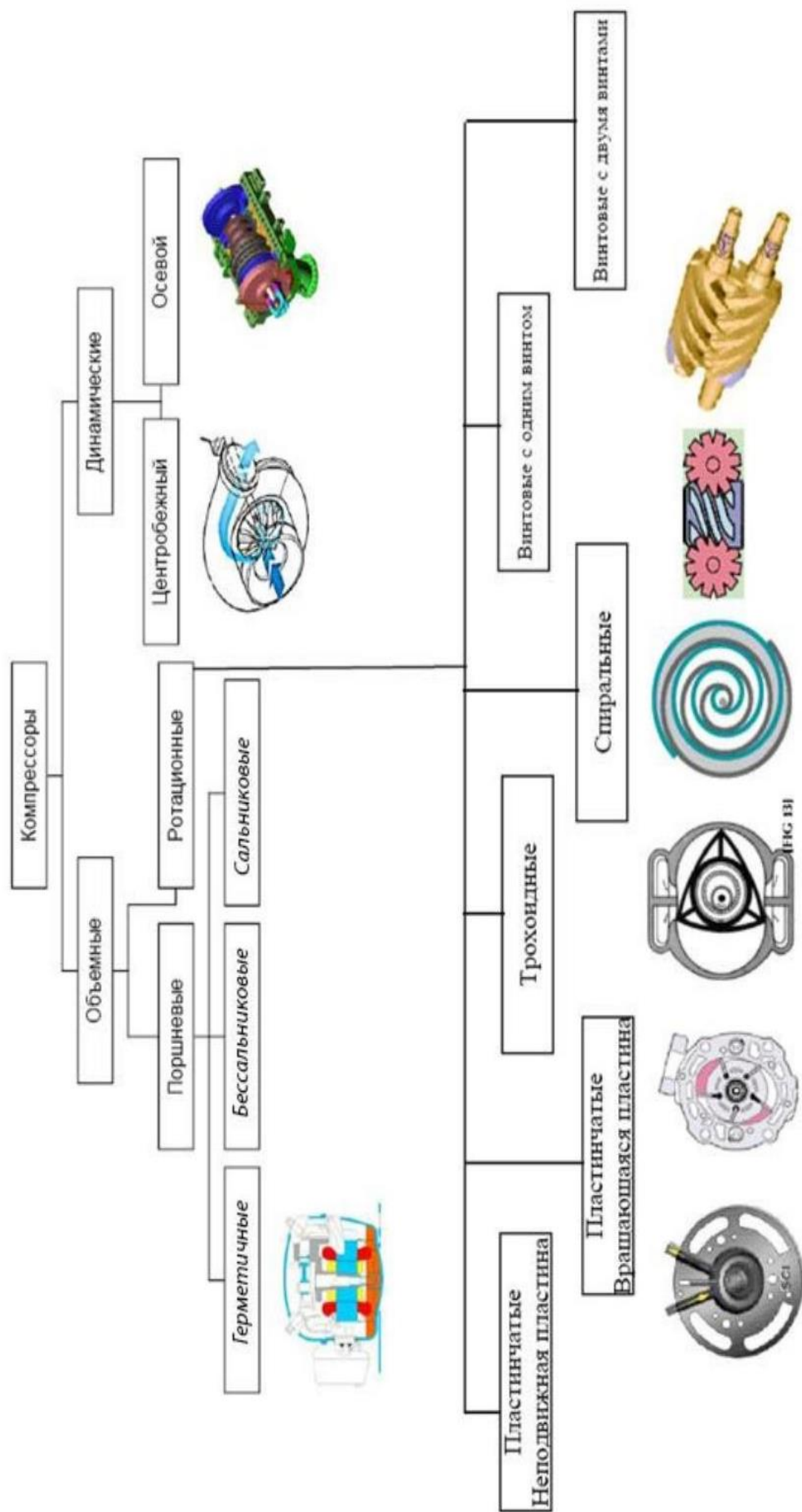


Рисунок 4.1 – Классификация холодильных компрессоров

По типу привода компрессоры бывают с непосредственным соединением вала электродвигателя с валом компрессора, через муфту и с приводом через ременную передачу.

Как известно, пары фреона очень текучи и могут проникать через малейшие неплотности. Поэтому для обеспечения герметичности фреоновых холодильных систем используют герметичные или бессальниковые компрессоры.

В современных герметичных компрессорах кривошипно-шатунный механизм часто заменяется высокооборотным (частота вращения 3000 об/мин) кривошипно-кулисным с внутренней подвеской. Достоинства этих компрессоров: меньшая масса и габариты, лучшие показатели по теплоэнергетическим характеристикам, низкий уровень шума и вибраций. Такой компрессор с вертикальным расположением вала подвешен на пружинах 23 (рисунок 4.2) внутри герметичного кожуха 1.

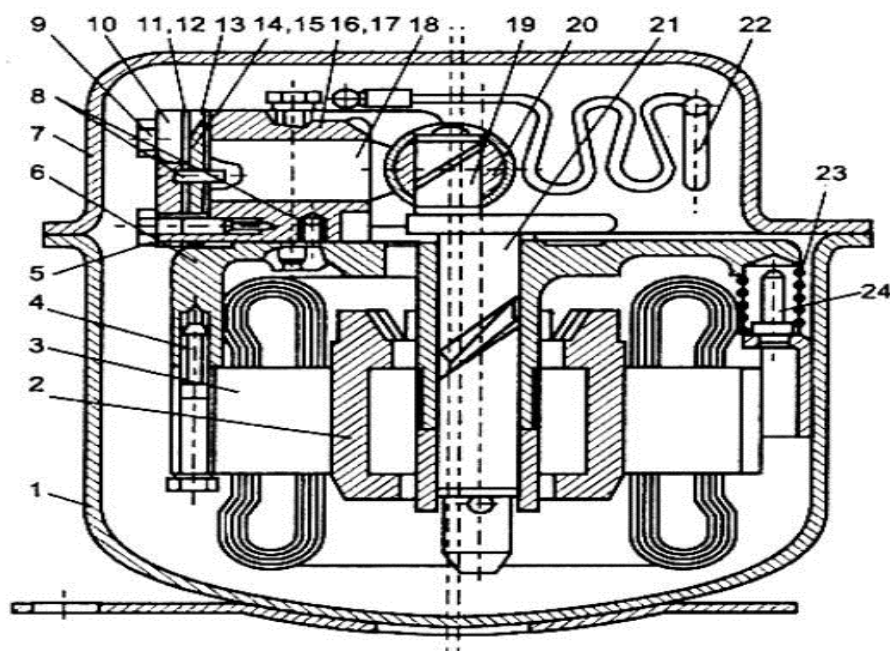


Рисунок 4.2 – Кулисный герметичный компрессор:

1 – кожух в сборе; 2 – ротор; 3 – статор; 4, 5, 9 – винты; 6 – корпус компрессора; 7 – крышка; 8 – штифты; 10 – головка цилиндра; 11 – прокладка клапана нагнетания; 12 – нагнетательный клапан; 13 – седло клапанов; 14 – всасывающий клапан; 15 – прокладка всасывающего клапана; 16, 17 – цилиндры; 18 – поршень; 19 – обойма; 20 – ползун; 21 – вал; 22 – трубка; 23 – пружина подвески; 24 – шпилька

В зависимости от конструкции подвески, пружины подвески работают на сжатие или растяжение и служат для гашения колебаний, возникающих при работе компрессора. Пружины крепятся на кронштейнах, находящихся в верхней части кожуха, и ввинчиваются в отверстия специальных приливов на корпусе 6.

Корпус компрессора в свою очередь приливами опирается на пружины. Электродвигатель однофазный, асинхронный, с пусковой обмоткой. для пуска

двигателя и защиты от перегрузок применяют пускозащитное реле. Ротор 2 электродвигателя помещен непосредственно на валу 21 компрессора. Статор 3 прикреплен к корпусу 6 компрессора четырьмя винтами. На торце цилиндра установлена прокладка 15 всасывающего клапана и сам клапан 14 на двух установочных цилиндрических штифтах 8. Нагнетательный клапан 12 вместе с ограничителем крепится к седлу заклепками. Клапаны лепестковые, выполнены из стальной высокоуглеродистой термически обработанной ленты и установлены на штифты 8. На тех же штифтах находятся скобы, ограничивающие подъем пластины клапана. Высота подъема всасывающего клапана $0,5 \pm 0,08$ мм, нагнетательного – 1,18 мм. Диаметр всасывающего отверстия 5 мм, нагнетательного – 3,4 мм.

Деталировка головки блока цилиндра и клапанная группа герметичного компрессора представлена на рисунке 4.3.

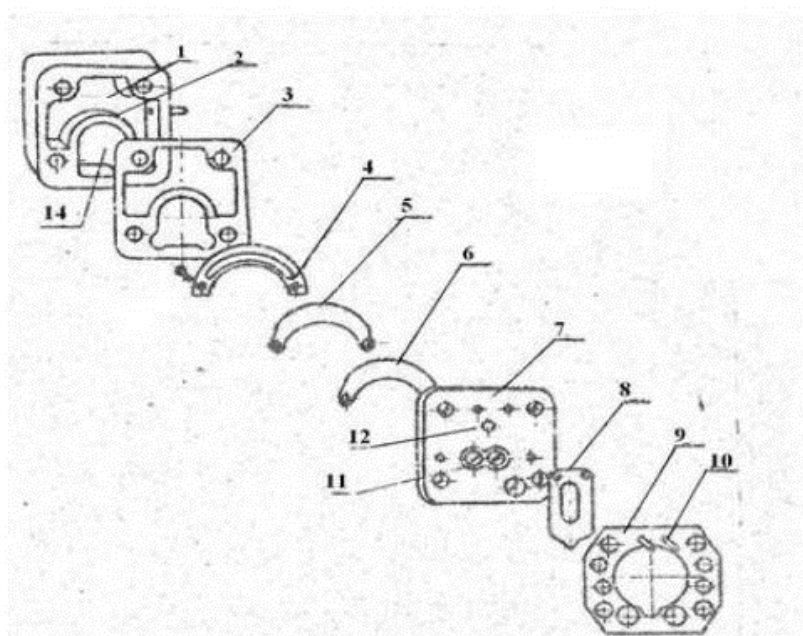


Рисунок 4.3 – Крышка блока цилиндра и клапанная группа герметичного компрессора:

- 1 – камера нагнетания; 2 – головка цилиндра с камерой всасывания и нагнетания;
- 3 – паронитовая прокладка; 4 – ограничитель хода нагнетательного клапана; 5 – рессора;
- 6 – клапан нагнетательный, подковообразный; 7 – доска клапанов; 8 – клапан всасывающий лепестковый; 9 – паронитовая прокладка цилиндра; 10 – штифты; 11 – отверстие всасывания с седлом – 2шт; 12 – отверстие нагнетания с седлом; 13 – винты крепления (заклёпки);
- 14 – камера всасывания

Вал 21 ротора 2 вращается в подшипниках скольжения, роль которых выполняет корпус компрессора. Кожух 1 мотор-компрессора изготовлен из листовой стали методом холодной штамповки. Трущиеся части компрессора смазываются маслом под действием центробежной силы через косое отверстие в нижнем торце коренной шейки вала. При вращении вала 21

масло, попадая в наклонный канал, поднимается вверх и подается к трущейся паре вал 21 — корпус 6 компрессора. Далее по винтовой канавке масло поступает к паре вал 21 — ползун 20. Пара поршень 18 — цилиндр 16 смазывается разбрызгиванием. Пары хладагента всасываются из кожуха в цилиндр 16 через глушитель всасывания и нагнетаются через глушитель нагнетания в трубку 22. Змеевик нагнетательной трубки 22 способствует гашению колебаний мотокомпрессора, корпус которого опирается на три пружины 23. Пружины предохраняют от выпадения шпилька 24. Кожух 1 закрыт сверху крышкой 7, приваренной по фланцу и ограничивающей перемещение мотор-компрессора вверх.

Общий вид бессальникового компрессора представлен на рисунке 4.4. Рассмотрим принцип работы поршневого компрессора (рисунок 4.5): на схеме "а" поршень движется вниз, давление внутри цилиндра понижается и становится меньше, чем во всасывающей патрубке (давления кипения). Всасывающий клапан 3 открывается, и по мере опускания поршня 5 пары хладагента заполняют цилиндр. После того как поршень пройдет нижнюю мертвую точку (схема "б"), он начинает двигаться в обратном направлении, сжимая пары в цилиндре, всасывающий клапан закрывается.

В это время нагнетательный клапан 2 остается закрытым, так как давление в цилиндре пока ниже давления в нагнетательном трубопроводе и еще недостаточно для того, чтобы преодолеть сопротивление нагнетательного клапана (схема "в"). На схеме "г" давление в цилиндре не только достигает значения, равного давлению в нагнетательном трубопроводе (давление конденсации), но и превосходит его настолько, чтобы преодолеть сопротивление нагнетательного клапана и открыть его. Сжатые пары получают возможность выхода из цилиндра до тех пор, пока поршень не дойдет до верхней мертвой точки (схема "д"). По конструктивным соображениям поршень, находясь в верхней мертвой точке, не должен соприкасаться с клапанной плитой 10, следовательно, в цилиндре остается какой-то объем, занятый паром. Геометрическое пространство, соответствующее этому объему, называют мертвым объемом. Как только поршень начинает двигаться в обратном направлении, т.е. опускаться, пары, заключенные в мертвом объеме, начинают расширяться и давление в цилиндре падает ниже давления в нагнетательном трубопроводе. Нагнетательный клапан 2 закрывается (схема "е"). В момент, когда давление в цилиндре становится ниже давления во всасывающем трубопроводе, открывается всасывающий клапан 3 (схема "а"), обеспечивая, таким образом, новый цикл.

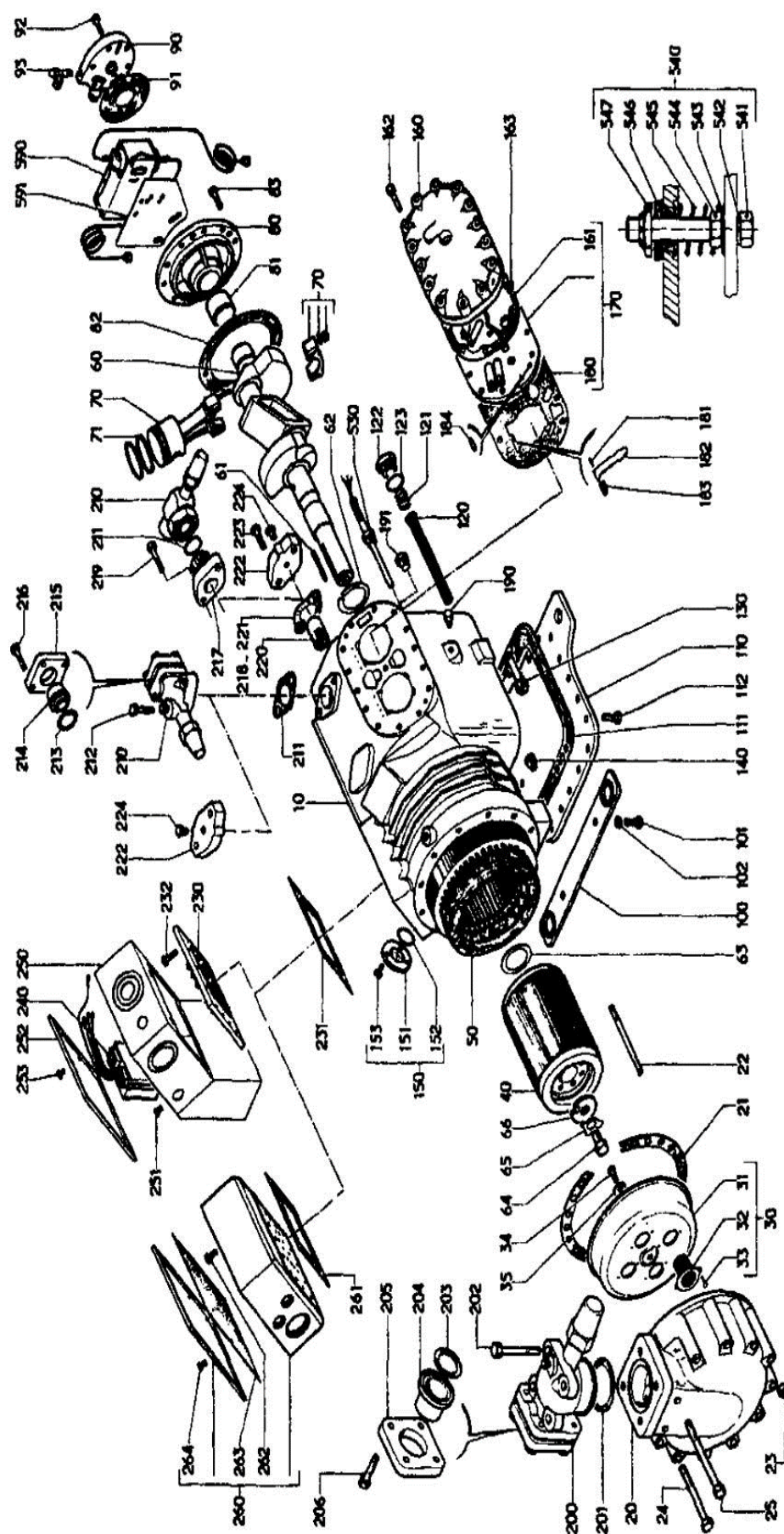


Рисунок 4.4 – Бессальниковый компрессор

Наличие мертвого пространства (расстояние от верхней кромки цилиндра до клапанной плиты), а также гидравлические сопротивления во всасывающих Δp_0 и нагнетательных Δp_k клапанах, теплообмена пара со стенками цилиндра, не плотностей, а также трения в трущихся частях компрессора уменьшают производительность компрессора и увеличивают затраты работы на выполнение рабочего цикла компрессора, повторяющегося при каждом обороте коленчатого вала. Все объемные потери действительного процесса компрессора учитываются коэффициентом подачи λ .

Для быстроходных современных компрессоров со значительной скоростью рабочего вещества вместе с паром в компрессор может попасть жидкое рабочее вещество, что приводит, как правило при продолжительной работе влажным ходом, к гидравлическому удару, т. к. жидкость не сжимаема, она, попадая между поршнем и крышкой цилиндра приводит к серьезным авариям.

Защиту компрессора от гидравлического удара в компрессорах средней и крупной производительности осуществляют с помощью буферной пружины, которая обеспечивает экстренный выброс жидкого хладагента, в случае попадания ее в цилиндр компрессора, за счет поднятия нагнетательного клапана и увеличения проходного сечения.

В герметичных и бессальниковых компрессорах пары, проходя через обмотку электродвигателя с одной стороны охлаждают его, а с другой, в случае попадания влажного пара, за счет теплообмена с обмоткой электродвигателя испаряются исключается влажный ход компрессора.

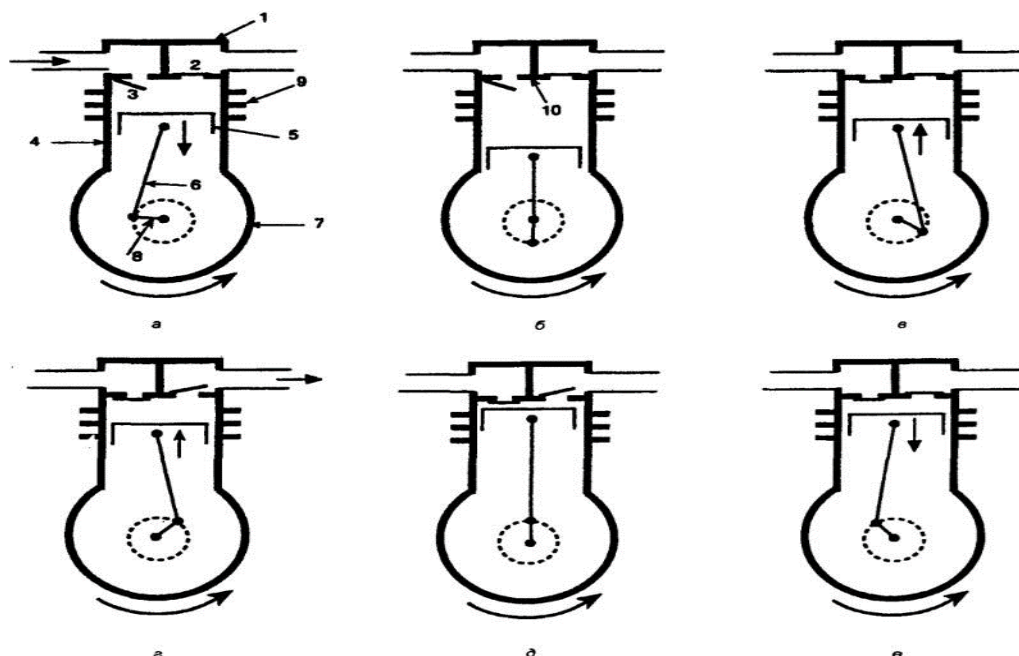


Рисунок 4.5 – Принцип работы поршневого компрессора:

- 1 – головка блока; 2 – нагнетательный клапан; 3 – всасывающий клапан; 4 – блок цилиндров;
 5 – поршень; 6 – шатун; 7 – картер; 8 – кривошип; 9 – охлаждающие ребра;
 10 – клапанная плита

Холодопроизводительность компрессора при стандартных температурных условиях дается в условном обозначении (марки) компрессора, например, марка компрессора типа ФУБС-14 означает, что компрессор фреоновый, расположение цилиндров V-образное, бессальниковый, холодопроизводительность 14000 ккал/ч (16,3 кВт). Сравнивая компрессоры по холодопроизводительности, необходимо при одинаковых температурных режимах.

Для среднетемпературных **аммиачных компрессоров**: $t_0 = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{вс}} = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_k = +30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_n = +25\text{ }^{\circ}\text{C}$;

для компрессоров, работающих на фреоне $t_0 = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{вс}} = +15\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_k = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_n = +25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Производительность при этих условиях называется «стандартной» холодопроизводительностью. На практике часто компрессора работают при условиях, отличающихся от нормальных (стандартных). Эти условия называются рабочими, а холодопроизводительность, определяемая при этих условиях, носит название рабочей.

Теоретический рабочий процесс компрессора изображается диаграммой с координатами: V – объем, p – давление пара (рисунок 4.6).

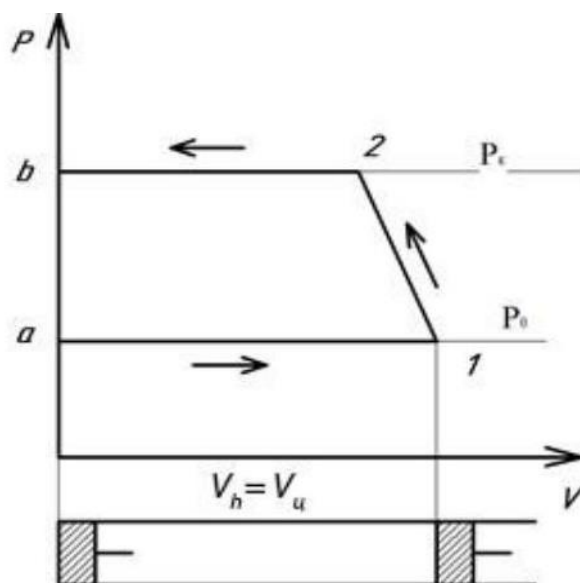


Рисунок 4.6 – Рабочие процессы теоретического компрессора

Прямая, $a-1$ характеризует процесс всасывания пара, протекающий при постоянном давлении p_0 , равном давлению в испарителе. Кривая $1-2$ характеризует процесс сжатия пара от давления p_0 до p_k . Прямая $2-b$ процесс выталкивания (нагнетания) при постоянном давлении p_k , равном давлению в конденсаторе. Объем пара, засасываемого компрессором, соответствует объему, описываемому поршнем $V_u = V_h$.

Действительный рабочий процесс компрессора (рисунок 4.7) отличается от теоретического величиной потерь, которые делятся на объемные и энергетические. К объемным относятся потери, вызванные наличием мертвого пространства λ_c , сопротивлением протеканию паров через всасывающий и нагнетательный клапана (дрессельные потери) $\lambda_{др}$, подогревом пара при всасывании (т.к. компрессор и соответственно его детали разогреваются при работе) λ_w , внутренними перетечками пара через неплотности в компрессоре $\lambda_{пл}$. К энергетическим можно отнести силы трения, возникающие при движении поршня в цилиндре и между другими частями компрессора. Объемные потери снижают производительность компрессора, энергетические – увеличивают затраты мощности.

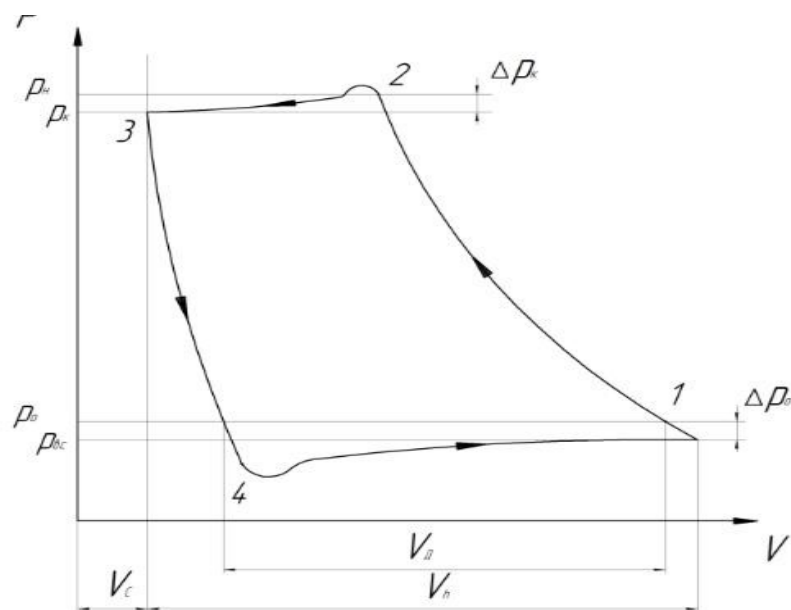


Рисунок 4.7 – Индикаторная диаграмма действительного компрессора

Все потери действительного компрессора учитываются коэффициентом подачи λ и могут быть определены по формуле

$$\lambda = \lambda_c \cdot \lambda_{др} \cdot \lambda_w \cdot \lambda_{пл} \quad (4.1)$$

Объемный коэффициент λ_c по формуле

$$\lambda_c = 1 - c \cdot \left(\frac{p_k}{p_0} \right)^{1/m} - 1, \quad (4.2)$$

где $c = 0,05 \dots 0,07$ – относительное мертвое пространство; $m = 0,9 \dots 1,05$ – показатель политропы для R 404a.

Коэффициент дросселирования,

$$\lambda_{др} = 1 - \frac{(1+c)}{\lambda_c} \cdot \left(1 - \frac{p_{вс}}{p_0} \right). \quad (4.3)$$

где $p_{вс} = p_0 - \Delta p_0$ – давление всасывания;

$\Delta p_0 = (0,01 \div 0,05)p_0$ – гидравлическое сопротивление во всасывающем клапане.

Коэффициент подогрева

$$\lambda_w = \frac{T_0 - t_0 + 273}{T_k - t_k + 273} \quad (4.4)$$

Коэффициенты плотности, $\lambda_{пл}$ расчетным способом получить невозможно, поэтому воспользуемся графиком (рисунок 4.8), в зависимости от степени сжатия $\pi = p_k/p_0$, для одноконтурного компрессора. В практических расчетах коэффициента подачи λ можно определить по графику, для одноконтурного компрессора (рисунок 4.9).

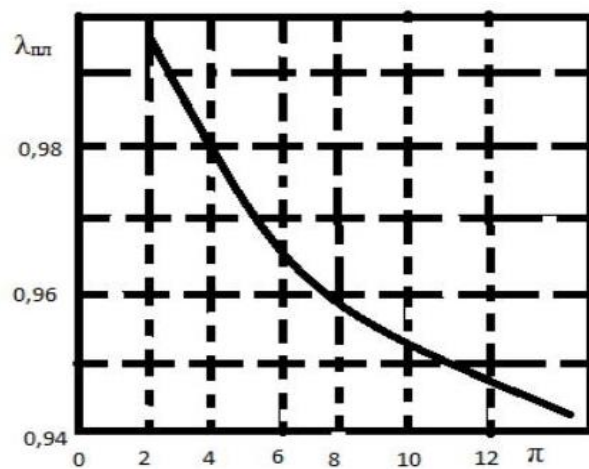


Рисунок 4.8 – Зависимость $\lambda_{пл} = f_{\pi}$

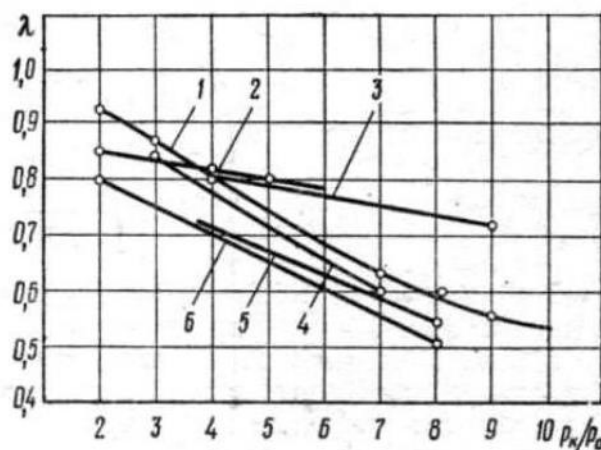


Рисунок 4.9 – Коэффициенты подачи компрессоров в зависимости от степени сжатия p_k/p_0 , для:

- 1 – поршневых работающих на аммиаке; 2 – винтовых, бустер компрессоров;
- 3 – винтовых; 4 – поршневых работающих на фреонах;
- 5 – ротационных; 6 – малых (в том числе герметичных) работающих на фреонах

Последовательность выполнения работы

В работе будут задействованы: компрессор (КМ), жидкостный испаритель (И), воздушный конденсатор (КД2), соленоидный вентиль 2СВ, рекуперативный теплообменник (ТО), нагреватель электрический (НЭ), насос (Н).

1. Подготовить установку к испытаниям. Удостовериться, что уровень теплоносителя в заливочном устройстве (У) не ниже его середины, иначе долить жидкость. Подтеки не допускаются.
2. Подключить стенд к сети 220 В.
3. Подключить автоматизированный стенд к USB-разъему компьютера.
4. Открыть вентили 3В1, 3В2, 3В4, 3В6, 3В9.
5. Закрыть РВ, 3В3, 3В5, 3В8, 3В10, 3В11.
6. Проверить, что переключатель «Воздухоохладитель-Испаритель» находится в положении «Испаритель». ВК4 – включен, регулятор скорости РС установить на max. ВК2, ВК3 – выключены.
7. Выставить температуру теплоносителя с помощью ТС, .
8. Включить холодильную установку однополюсным QF1, «сеть».
9. Запустить программу Пуск → Программы → MeasLAB Explorer.
10. Включить ВК5 – насос, ВК6 – нагреватель и затем ВК1-компрессор.
11. При включении компьютерной системы измерения клавишей «Старт» в программе на цифровых индикаторах отображаются мгновенные значения температур и графики их изменения.
12. При установившемся режиме снять показания приборов и занести их в таблицу 4.1.
13. После снятия замеров перевести кнопку «Воздухоохладитель-Испаритель» в среднее положение, подождать отключения компрессора по давлению всасывания, выключить QF1 «Сеть 220 В».

Обработка результатов

Холодопроизводительность определяется по формуле,

$$Q_0 = V_h \lambda q_v, \text{ кВт} \quad (4.5)$$

где q_v – удельная объемная холодопроизводительность;

$$q_v = q_0 / v_1 \quad (4.6)$$

v_1 – удельный объем паров, поступающих из испарителя в компрессор, м³/кг;
 $q_0 = i_1 - i_4$ – удельная холодопроизводительность; λ – коэффициент подачи при рабочих условиях, определяется по графику (рисунок 4.7).

V_h – объем, описываемый поршнями компрессора – это объем, который освобождается в цилиндре при перемещении поршня от НМТ (нижней мертвой точки) до ВМТ (верхней мертвой точки)

$$V_h = \frac{\pi \cdot D^2}{4} S \cdot Z \cdot n, \quad (4.7)$$

где D – диаметр цилиндра, м;

S – ход поршня, м;

z – число цилиндров;

n – число оборотов эл. двигателя, об/мин.

Для компрессора, установленного на стенде $V_h = 0,43 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$.

Для определения мощности электродвигателя необходимо знать режим работы компрессора.

Адиабатическая мощность, затрачиваемая в теоретическом процессе сжатие G_a кг/с пара в компрессоре, определяется по формуле

$$N_a = G_a (i_2 - i_1) \quad (4.8)$$

где $G_a = Q_0 / q_0$ – массовый расход холодильного агента.

Мощность, – затраченную на сжатие пара в действительном процессе, определяют по индикаторной диаграмме и называют индикаторной.

$$N_i = N_a / \eta_i \quad (4.9)$$

где $\eta_i = \lambda_w + b \cdot t_0$ – индикаторный к.п.д;

t_0 – температура кипения, подставляется в формулу с соответствующим знаком;

$\lambda_w = T_0 / T_k$ – коэффициент подогрева;

T_0, T_k b – абсолютная температура кипения и конденсации, в градусах К.

Коэффициент $b=0,0025$ для фреоновых компрессоров; $b=0,001$ для аммиачных.

Под эффективной мощностью понимают мощность на валу компрессора, которая равна сумме мощностей индикаторной и трения:

$$N_e = N_i + N_{mp} \quad (4.10)$$

где N_{mp} – мощность, затрачиваемая на трение (мощность, холостого хода), кВт.

Для определения N_{mp} пользуются выражением:

$$N_{mp} = p_{mp} \cdot V_h, \text{ кВт} \quad (4.11)$$

где p_{mp} – величина удельного давления трения, которая зависит от производительности компрессора, т. е. от основных его размеров и быстроходности, считается величиной постоянной и равной $p_{mp}=60$ кПа для аммиачных компрессоров и $p_{mp}=40$ кПа для фреоновых.

Мощность электродвигателя рекомендуется выбирать с запасом 10÷12 % во избежание его перегрузки, тогда:

$$N_{эл} = (1,1 \div 1,12) \cdot N_e / \eta_n \quad (4.12)$$

где $\eta_n = 0,96 \div 0,99$ – к.п.д. ременной передачи.

$\eta_n = 0,98 \div 0,99$ – при соединении эластичной муфтой.

$\eta_n = 1$ для бессальниковых и герметичных компрессоров.

Мощность на валу компрессора будет меняться в зависимости от режима его работы (см. практ. работу № 3). Поэтому необходимо проверять мощность в действительном режиме работы.

В случае если расчетная $N_{эл} > N_{эл}$ установленного на компрессор электродвигателя, необходимо заменить его на более мощный. Это возможно сделать только в сальниковых компрессорах. В бессальниковых и герметичных следует выбрать следующий по типоразмеру. При этом необходимо отметить,

что герметичные компрессоры выпускаются для работы в различных температурных режимах:

- высоко температурные (в основном для систем кондиционирования воздуха);
- среднетемпературные;
- низко температурные.

Отличаются они в том числе и мощностью установленного электродвигателя.

Действительный холодильный коэффициент:

$$\varepsilon = \frac{Q_0}{N_e} \quad (4.12)$$

Таблица 4.1 – Протокол результатов измерений

Измеряемые параметры				Расчётные параметры								
t_0 , °C	t_k , °C	$t_{вс}$, °C	$t_{по}$, °C	N_a , Вт	$N_{тр}$, Вт	N_e , Вт	N_i , Вт	$N_{эл}$, Вт	q_v , кДж/м³	λ	Q_0 , Вт	ε

Контрольные вопросы

1. Дать классификацию компрессоров.
2. Изучить устройство и принцип работы компрессора.
3. Описать основные узлы и детали герметичного компрессора.
4. Дать эскизную проработку узлов компрессора (по заданию преподавателя), указать место установки и назначение узла и детали.
5. Построить цикл холодильной машины по замеренным параметрам в диаграмме $\lg p - i$, для R404a.
6. Рассчитать холодопроизводительность при рабочих условиях.
7. Рассчитать эффективную мощность компрессора и мощность электродвигателя. Сравнить с измеренной в рабочем режиме.
8. Основные узлы герметичного компрессора и принцип его работы.
9. Механизм работы нагнетательного клапана компрессора в случае попадания в цилиндр жидкого холодильного агента.
10. Влияние величины относительного мертвого объема на энергетические показатели холодильной машины.
11. Принцип действия системы смазывания компрессора в холодильных установках.

Практическая работа № 5. Изучение конструкции воздухоохладителя и определение его коэффициента теплопередачи

Цель работы: формирование практических умений и навыков по теплопередачи и экспериментального исследования работы воздухоохладителя.

Задачи работы

1. Изучение конструкции воздухоохладителя.
2. Испытание воздухоохладителя при работе холодильной установки для определения его коэффициента теплопередачи.

Краткие теоретические сведения

При охлаждении камер для хранения продуктов, помещений в системах кондиционирования воздуха, в торговом оборудовании в основном используется воздушное охлаждение с помощью батарей и ли воздухоохладителей.

Батареи непосредственного испарения представляют собой теплообменные аппараты, располагаемые в охлаждаемых помещениях или в кожухе воздухоохладителей. Охлаждение происходит путем непосредственной теплопередачи от воздуха к холодильному агенту, испаряющемуся внутри трубчатой системы при соответствующей температуре.

Следует отметить, что коэффициент теплопередачи гладкотрубных охлаждающих батарей почти полностью определяется значением коэффициента теплоотдачи от воздуха к поверхности батарей. Сопротивление металлической стенки можно не учитывать; мало также сопротивление теплообмена между стенкой и кипящим холодильным агентом (при непосредственном охлаждении) или протекающим рассолом (при рассольном). Сопротивление загрязнений (масло, осадок и пр.), а также сопротивление слоя снеговой шубы являются переменными величинами и зависят от своевременной продувки батарей от масла и своевременного удаления снеговой шубы. Допустимым считается снеговая шуба толщиной не более 5–6 мм. В среднем на снеговую шубу и загрязнения при нормальной эксплуатации приходится 30 % от общей величины сопротивлений теплопередаче в охлаждающих батареях.

С учетом небольшого значения коэффициента теплоотдачи от воздуха к поверхности батарей с целью интенсификации теплопередачи наружную поверхность труб оребряют. Применение оребренных труб, по сравнению с гладкими, позволяет сократить их расход примерно в 3 раза, а расход металла на изготовление охлаждающих батарей – почти в 1,5 раза.

Коэффициент теплопередачи батарей из гладких труб при естественной циркуляции воздуха составляет от 3 до 6 Вт /м²×К; он зависит от диаметра труб, конструктивных размеров батарей, перепада температур и других факторов.

Коэффициент теплопередачи батарей из оребренных труб зависит от вида оребрения, конструкции батарей и других факторов. В среднем коэффициент теплопередачи для оребренных батарей не превышает 6–10 Вт /м²×К.

Приведенные значения справедливы с учетом незначительного загрязнения труб батарей и при толщине снеговой шубы не более 5–6 мм. При большей толщине снеговой шубы, особенно при полном заполнении снегом промежутка между ребрами, коэффициент теплопередачи резко уменьшается.

Для интенсификации теплообмена охлаждающая батарея помещается в кожух и оснащается вентилятором для принудительного обдува воздухом. В результате получается – воздухоохладитель.

Воздухоохладители подразделяются на поверхностные (сухие), контактные (мокрые) и смешанного типа.

В контактных воздухоохладителях отвод тепла от воздуха происходит за счет непосредственного контакта последнего с водой или теплоносителем. Контактные воздухоохладители выполняются форсуночными или с орошаемой насадкой. Широкое применение нашли в системах кондиционирования воздуха, где кроме температуры необходимо поддерживать и определенную относительную влажность воздуха.

В испарителях смешанного типа отвод теплоты от воздуха происходит за счет кипения рабочего вещества в трубах и за счет контакта с рассолом, охлаждаемым на поверхности труб путем их орошения. В таких воздухоохладителях не образуется снеговая шуба.

Наибольшее распространение получили поверхностные воздухоохладители. На рисунке 5.1 приведен общий вид фреонового воздухоохладителя. Подача фреона в змеевик воздухоохладителя производится с помощью терморегулирующего вентиля (ТРВ). Если воздухоохладитель имеет несколько параллельно включенных змеевиков, то после ТРВ устанавливают распределитель фреона («паук»), который служит для того, чтобы обеспечить равномерное распределение фреона параллельно включенным секциям воздухоохладителя.

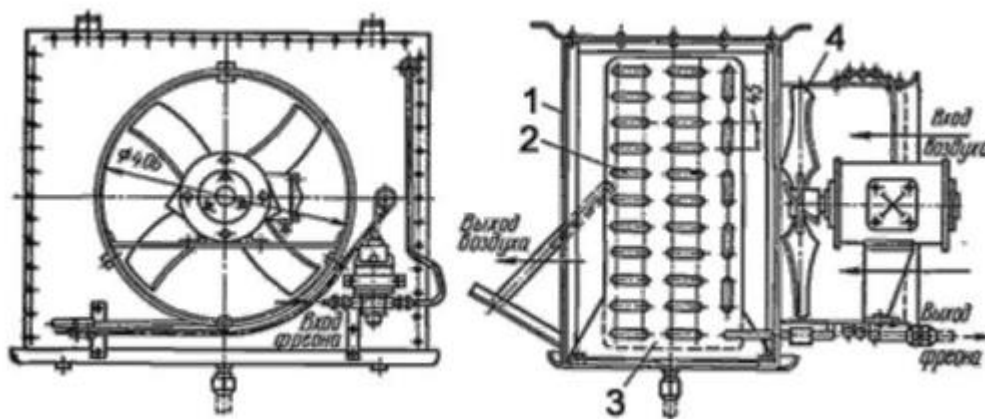


Рисунок 5.1 – Фреоновый воздухоохладитель с непосредственным кипением холодильного агента:

1– корпус; 2 – змеевики; 3 – пластинчатые ребра; 4 – вентилятор

Воздухоохладитель имеет вентилятор 4 для принудительной циркуляции воздуха через охлажденную поверхность. Если распределение воздуха в охлаждаемом помещении производится с помощью каналов, то напор вентилятора выбирается с учетом сопротивлений в каналах. Для отвода талой воды при удалении снеговой шубы воздухоохладитель снабжается поддоном.

Поддон и трубка для отвода талой воды имеют электрообогрев для предотвращения замерзания талой воды.

Последовательность выполнения работы

В работе будут задействованы следующие основные устройства: компрессор (КМ), воздухоохладитель (ВО), воздушный конденсатор (КД2), соленоидный клапан (1СВ), терморегулирующий клапан (ТРВ 1), рекуперативный теплообменник (ТО). Дополнительное оборудование: Анемометр, линейка.

1. Ознакомиться с конструкцией воздухоохладителя (рисунок 5.2) на стенде, сняв защитный кожух воздухоохладителя.

Площадь поверхности $F = 3,3 \text{ м}^2$.

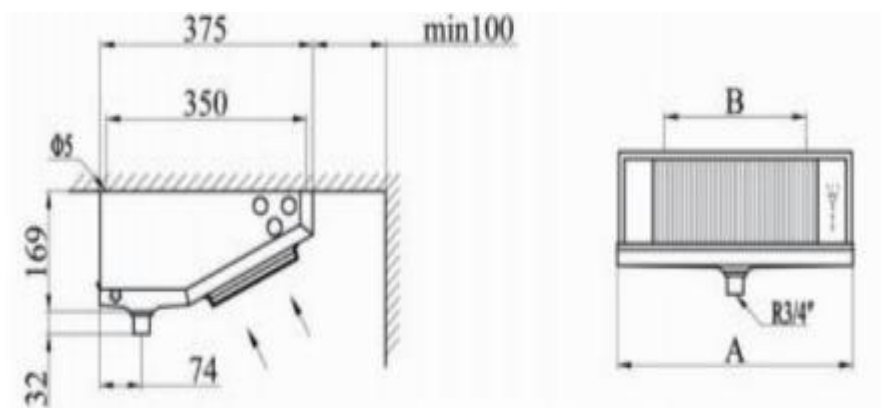


Рисунок 5.2 – Геометрические размеры воздухоохладителя

2. Ознакомиться со схемой установки и расположением приборов можно на рисунке 1, приложение А. Составить описание и заготовить таблицы для регистрации результатов испытаний.

3. Подключить стенд к сети 220 В.

4. Подключить автоматизированный стенд к USB разъему компьютера.

5. Открыть клапаны 3В4, 3В6, 3В9.

6. Закрыть РВ, 3В 1, 3 В 3, 3 В 5, 3В 8, 3В 10, 3В 11.

7. Проверить кнопка «Воздухоохладитель-Испаритель» должна находиться в положении – «Воздухоохладитель». ВК 4 – включен, регулятор скорости РС установить на тах, ВК 5 и ВК6 – выключены.

8. Выставить температуру в камере $t_{\text{хк}} = 0^{\circ} \text{С}$, с помощью терморегулятора РТ.

9. Включить холодильную установку однополюсным QF1 «Сеть 220 В».

10. Включить ВК 1 – компрессор и ВК 3 – воздухоохладитель. ВК 2 должен быть выключен.

11. Запустить программу Пуск → Программы → MeasLAB Explorer.

12. При включении компьютерной системы измерения клавишей «Старт» в программе на цифровых индикаторах лицевой панели отображаются мгновенные значения температур, измеряемых всеми датчиками, и графики их изменения по времени.

13. При установившемся режиме снять показания приборов. Измерить скорость течения воздуха w через живое сечение воздухоохладителя с помощью анемометра, занести значения в таблицу 5.1.

14. После снятия замеров кнопку «Воздухоохладитель-Испаритель» перевести в среднее положение, подождать отключения компрессора, по давлению всасывания, выключить QF1 «Сеть 220 В».

Обработка результатов

1. Тепловая нагрузка на воздухоохладитель определяется по формуле, Вт

$$Q_0 = G \cdot C_p (t_B^{\text{BX}} - t_B^{\text{ВЫХ}}), \quad (5.1)$$

где $G = w \times f \times \rho$ массовый расход воздуха через воздухоохладитель, кг/с;

w – скорость движения воздуха в живом сечении, м/с;

C_p – теплоемкость воздуха, Дж/кг К;

f – живое сечение «окна» для прохода воздуха, м²;

ρ – плотность воздуха, кг/м³;

Ср ρ – берутся при средней температуре воздуха в воздухоохладителе,

$$t_{cp} = (t_B^{\text{BX}} + t_B^{\text{ВЫХ}})/2 \quad (5.2)$$

2. Коэффициент теплопередачи K определяется по формуле, Вт/м²×К

$$K = \frac{Q_0}{F \cdot \theta} = \frac{Q_0}{F \cdot \Delta t_{cp}} \quad (5.3)$$

3. Если величины $\Delta t_6 = t_{B3}^{\text{BX}} - t_0$ и $\Delta t_m = t_{B3}^{\text{ВЫХ}} - t_0$ (рисунок 5.3) незначительно отличаются друг от друга, а их отношение $\Delta t_6 / \Delta t_m \leq 2$, то средний температурный напор можно определить из выражения,

$$\Delta t_{cp} = (\Delta t_6 + \Delta t_m)/2 \quad (5.4)$$

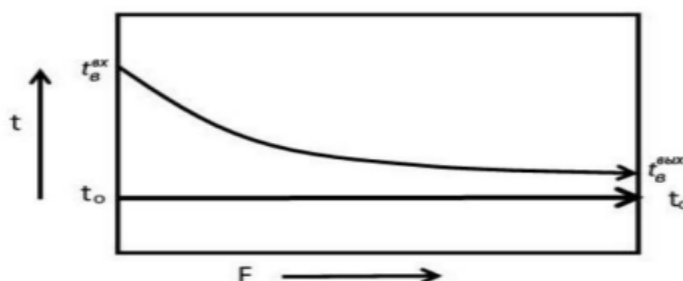


Рисунок 5.3 – Распределение температур по поверхности

Таблица 5.1 – Протокол результатов измерений и вычислений

№ п/п	$t_{\text{в}}^{\text{вх}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{в}}^{\text{вых}}, ^\circ\text{C}$	$t_0, ^\circ\text{C}$	$W, \text{м/с}$	$G, \text{кг/с}$	$Q_0, \text{Вт}$	$\Delta t_{\text{ср}}, ^\circ\text{C}$	$K, \text{Вт}/(\text{м}^2 \times \text{K})$

Контрольные вопросы

1. Краткое описание экспериментальной установки.
2. Схема экспериментальной установки. Классификация батарей.
3. Описание конструкции поверхностного воздухоохладителя и расчеты.
4. Определение термодинамических свойств воздуха.
5. Случаи расчетов коэффициента теплопередачи с учетом использования среднего температурного напора.
6. Преимущество охлаждения с помощью воздухоохладителя по сравнению с батарейным охлаждением.
7. Типы воздухоохладителей. Преимущества воздухоохладителей смешанного типа.
8. Сферы применения контактных воздухоохладителей.

Практическая работа № 6. Изучение конструкции воздушного конденсатора и определение его коэффициента теплопередачи

Цель работы: формирование практических умений и навыков по механизму процесса теплопередачи и приобретения навыков экспериментального исследования работы воздушного конденсатора.

Задачи работы:

1. Изучение конструкции воздушного конденсатора.
2. Испытание воздушного конденсатора при работе холодильной машины для определения его коэффициента теплопередачи.

Дополнительное оборудование: Анемометр, штангенциркуль, линейка.

Краткие теоретические сведения

В холодильных машинах применяются водяные (кожухотрубные и кожухомеевиковые), воздушные и водо-воздушные (оросительные и испарительные) конденсаторы. Конденсация пара холодильного агента осуществляется за счет передачи теплоты в окружающую среду.

Передача теплоты от одной среды (пара) к другой (воде или воздуху) осуществляется через разделяющую поверхность (обычно стенку труб) и называется теплопередачей. Теплопередача включает в себя теплоотдачу от более горячей среды (пара) к стенке, теплопроводность стенки и теплоотдачу от стенки к более холодной среде (воде или воздуху).

Коэффициент теплопередачи – K характеризует интенсивность передачи теплоты и численно равен количеству теплоты, которое передается в единицу времени через единицу поверхности стенки при разности температур между средами в один градус.

В целях экономии пресной воды все чаще осуществляется переход от конденсаторов с водяным охлаждением к воздушным. В воздушных конденсаторах основное термическое сопротивление сосредоточено, как правило, со стороны воздуха. Однако при высокой степени наружного оребрения и интенсификации внешнего теплообмена внутреннее тепловое сопротивление, со стороны хладагента, может приближаться к наружному. Основными направлениями интенсификации теплообмена со стороны воздуха являются: применение оребренных поверхностей определенных форм и размеров, турбулизация потока воздуха. Повышение коэффициента теплоотдачи (и соответственно теплопередачи) со стороны воздуха можно получить путем уменьшения диаметра трубок и шага ребер. Первое для наружного теплообмена имеет меньшее значение, так как площадь поверхности труб составляет обычно 5–10 % от общей площади наружной оребренной поверхности.

Конструктивно такие аппараты состоят из нескольких секций, соединенные последовательно калачами и параллельно - коллекторами. Секции представляют собой плоский оребренный змеевик из медных или стальных труб диаметром от 6 до 20 мм. Ребра стальные или алюминиевые, обычно прямоугольной формы. Шаг ребер не менее 1 мм, в противном случае происходит быстрое загрязнение теплопередающей поверхности. Пар хладагента подводится сверху к первой секции или к паровому коллектору, жидкость отводится снизу из последней секции или жидкостного коллектора. При расчете воздушных конденсаторов возникает необходимость определения коэффициента теплопередачи от пучка оребренных труб. Здесь расчетные зависимости имеют более сложный характер, чем для гладкотрубных пучков. Это обусловлено влиянием формы, размеров, шага ребер, их тепловой эффективности.

При передаче теплоты от капельной жидкости (α_1) через плоскую стенку к газу (α_2) суммарное термическое сопротивление $1/K$ определяют по формуле

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}; \quad (6.1)$$

где α_1 , α_2 – коэффициент теплоотдачи соответственно от капельной жидкости к внутренней поверхности трубы и от наружной поверхности трубы к газу (воздуху).

Наибольший вклад в суммарное термическое сопротивление вносит последний член $\frac{1}{\alpha_2}$, он на один, а иногда и на два порядка меньше первого члена $\frac{1}{\alpha_1}$.

Обычно повысить a_2 за счет увеличения скорости движения воздуха не удастся, так как это приводит к значительному увеличению аэродинамическим сопротивлений и поэтому – используют оребрение со стороны газа (воздуха).

Тогда коэффициент теплопередачи к неоребренной внутренней поверхности можно определить по формуле:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \times \frac{F_H}{F_{BH}}} \quad (6.2)$$

где F – наружная оребренная поверхность; F_{BH} – внутренняя, гладкая.

Отношение оребренной поверхности к гладкой (внутренней) называется коэффициентом оребрения β

$$\beta = \frac{F_H}{F_{BH}}. \quad (6.3)$$

Последовательность выполнения работы

Воздушный конденсатор с принудительной циркуляцией воздуха (с вентилятором) состоит из z секций, соединенных между собой коллекторами. Секция представляет собой последовательно расположенные оребренные трубки диаметром d соединенных калачами. Ребра алюминиевые прямоугольной формы с шагом i . Пары хладагента подводятся сверху, жидкий отводится снизу. Площадь наружной поверхности воздушного конденсатора равна площади поверхности змеевика плюс суммарная площадь листов, выполняющих роль ребер.

В работе будут задействованы следующие основные устройства: компрессор (КМ), воздухоохладитель (ВО), воздушный конденсатор (КД2), соленоидный клапан (ICV), терморегулирующий клапан (ТРВ 1), рекуперативный теплообменник (ТО).

1. Ознакомиться с конструкцией воздушного конденсатора. С помощью штангенциркуля и линейки измерить размеры конденсатора и записать их:

z – количество секций по «ходу» воздуха, шт;

N – количество трубок в секции, шт;

d – наружный диаметр трубок, м;

D – средний диаметр изгиба калача, м;

L – длина трубки, м;

D – диаметр трубок калача, м;

n – количество ребер, шт;

i – шаг ребер, м;

H – высота ребер, м;

B – ширина ребер, м;

$\delta = 0,0004$ м – толщина стенки трубки, м.

2. Ознакомиться со схемой установки и расположением приборов можно на рисунке 1, приложение А и составить описание и заготовить таблицы для регистрации результатов испытаний.

3. Подключить стенд к сети 220 В.

4. Подключить автоматизированный стенд к USB разъему компьютера.

5. Открыть клапаны 3 В 4, 3В 6, 3 В 9.

6. Закрывать РВ, ЗВ 1, ЗВ 3, ЗВ 5, ЗВ 8, ЗВ 10, ЗВ 11.

7. Проверить – кнопка «Воздухоохладитель-Испаритель» должна находиться в положении – «Воздухоохладитель». ВК 4 – включен, регулятор скорости РС установить на тах, ВК 5 и ВК 6 – выключены.

8. Выставить температуру в камере $t_k = 0^\circ \text{C}$, с помощью терморегулятора РТ.

9. Включить холодильную установку однополюсным QF1 «Сеть 220 В».

10. Включить ВК 1 – компрессор и ВК 3 – воздухоохладитель. ВК 2 должен

быть выключен.

11. Запустить программу Пуск → Программы → MeasLAB Explorer.

12. При включении компьютерной системы измерения клавишей «Старт» в программе на цифровых индикаторах лицевой панели отображаются мгновенные значения температур, измеряемых всеми датчиками, и графики их изменения по времени.

13. С помощью регулятора скорости РС, изменяя частоту вращения крыльчатки вентилятора воздушного конденсатора установить давление конденсации по манометру Р 12. $P_k = 171 \text{ бар}$.

14. При установившемся режиме снять показания приборов через каждые 2 мин и занести их в таблицу 6.1. Измерить скорость течения воздуха и через живое сечение конденсатора с помощью анемометра, режим Nel.

15. Изменить расход воздуха, подаваемого на конденсатор регулятором РС и установить давление конденсации $p_k = 191 \text{ бар}$, снять замеры, режим N°II.

16. После снятия замеров кнопку «Воздухоохладитель-Испаритель» перевести в среднее положение, подождать отключения компрессора, по давлению всасывания, выключить QF1 «Сеть 220 В».

Обработка результатов

1. Тепловая нагрузка на конденсатор определяется по формуле, Вт

$$Q_k = G \cdot c_p (t_B^{\text{BX}} + t_B^{\text{ВЫХ}}), \quad (6.4)$$

где G – массовый расход воздуха через конденсатор, кг/с;

w – скорость движения воздуха, м/с;

c_p – теплоемкость воздуха, Дж/ (кг×К);

f – живое сечение «окна» для прохода воздуха, м²;

ρ – плотность воздуха, кг/м³;

ρ – берутся при средней температуре воздуха в конденсаторе

$$t_{cp} = \frac{(t_B^{\text{BX}} + t_B^{\text{ВЫХ}})}{2} \quad (6.5)$$

2. Коэффициент теплопередачи K определяется по формуле, Вт/(м²× К)

$$K = \frac{Q_k}{F \cdot \Delta t_{cp}} = Q_k / (F \cdot \Delta t_{cp}) \quad (6.6)$$

3. Наружная поверхность конденсатора определяется с учетом оребрения, т.к. воздух движется со скоростью w только через оребренную поверхность – площадь калачей не учитывается.

$$F = F_{\text{тр}} + 2F_p \quad (6.7)$$

Внутренняя поверхность, m рассчитывается:

$$F_{\text{вн}} = \pi d_{\text{вн}} \cdot N \cdot L \cdot z + \frac{\pi^2 \cdot D \cdot d_{\text{вн}} \cdot N \cdot z}{2} \quad (6.8)$$

где $d_{\text{вн}} = d - 2\delta$ – внутренний диаметр трубки, m .

4. Если величины $\Delta t_{\text{г}} = t_{\text{к}} - t_{\text{вх}}^{\text{вх}}$ и $\Delta t_{\text{м}} = t_{\text{к}} - t_{\text{вх}}^{\text{вых}}$ (рисунок 6.1) незначительно отличаются друг от друга, а их отношение $\Delta t_{\text{г}} / \Delta t_{\text{м}} \leq 2$, то средний температурный напор можно определить из выражения

$$\Delta t_{\text{ср}} = (\Delta t_{\text{г}} + \Delta t_{\text{м}}) / 2$$

Если, $\Delta t_{\text{г}} / \Delta t_{\text{м}} > 2$ температурный напор определяется по формуле

$$\theta = \frac{\Delta t_{\text{г}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\text{г}}}{\Delta t_{\text{м}}}} \quad (6.9)$$

5. Коэффициент оребрения

$$\beta = \frac{F_{\text{н}}}{F_{\text{вн}}} \quad (6.10)$$

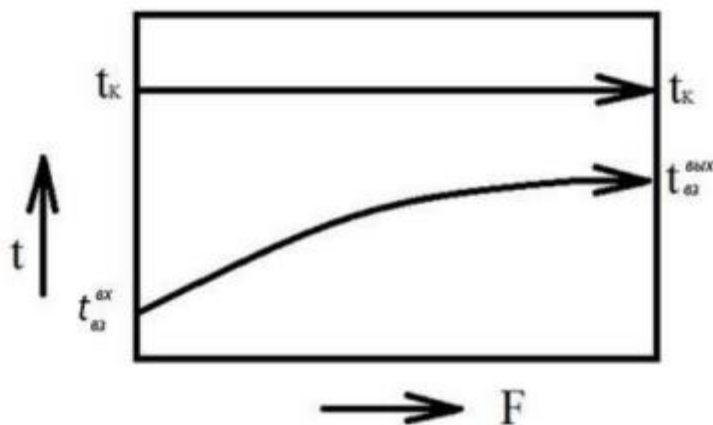


Рисунок 6.1 – Распределение температур по поверхности

Таблица 6.1 – Протокол испытаний

№ п/п	$t_{\text{вх}}^{\text{вх}},$ °C	$t_{\text{вх}}^{\text{вых}},$ °C	$t_{\text{к}},$ °C	W м/с	$G,$ кг/с	$Q_{\text{к}},$ Вт	F, m^2	$Q_0,$ кВт	$\Delta t_{\text{ср}},$ (□) °C	$K,$ Вт/(м ² ×K)	β
Режим № 1											
1											
2											
3											
Режим											

№ п/п	$t_{вз}^{вх},$ °C	$t_{вз}^{вых},$ °C	$t_k',$ °C	W М/с	G, кг/с	Q _к , Вт	F, м ²	Q ₀ , кВт	$\Delta t_{ср},$ (□) °C	K ₂ , Вт/(м ² ×К)	β
№ 2											
1											
2											
3											

Контрольные вопросы

1. Физический смысл коэффициента теплопередачи.
2. Механизм определения термодинамических свойств воздуха.
3. Специфика применения наружного оребрения труб.
4. Влияние скорости воздуха на изменение коэффициента теплопередачи.
5. Характеристика логарифмической разности температур.
6. Типы конденсаторов, применяемых в холодильной технике.
7. Что показывает коэффициент оребрения

Практическая работа № 7. Изучение работы холодильной установки в регенеративном цикле. Изучение конструкции рекуперативного теплообменного аппарата

Цель работы: формирование практических умений и навыков по конструктивным особенностям пластинчатого теплообменного аппарата, его теплопередачи.

Задачи работы

1. Изучение конструкций пластинчатых теплообменных аппаратов.
2. Испытание холодильной установки в действительном цикле работы.

Краткие теоретические сведения

При работе холодильной машины по схеме рисунка 7.1, жидкое рабочее вещество после конденсатора II охлаждается в рекуперативном поверхностном теплообменном аппарате III, за счет холодного пара, поступающего из испарителя. В результате удельная холодопроизводительность увеличивается на $\Delta q_0 = i_6 - i_5$, но одновременно увеличивается и теплота конденсации на отрезок 2-b, $\Delta q_k = i_2 - i_b$. Эффективность этого цикла зависит от соотношения $\Delta q_0 / \Delta q_k$, т.е. от термодинамических свойств рабочих веществ и применяется для веществ с относительно большими потерями, связанными с дросселированием и относительно малыми потерями, связанными с перегревом рабочего вещества, т.е. для большинства хладагентов.

Как видно из рисунка 7.1, в схему включен теплообменный аппарат III. В качестве рекуперативных теплообменных аппаратов могут использоваться

кожухотрубные, кожухомеевиковые, «труба в трубе», а в последнее время и пластинчатые аппараты.

Пластинчатые теплообменные аппараты состоят из однотипных пластин, объединенных в пакет, и могут выполняться разборными, полуразборными и неразборными (паянными).

Наиболее широко применяются разборные пластинчатые теплообменники. Они состоят из отдельных пластин 15 (рисунок 7.2), собираемых в пакет по несколько штук с уплотнением между ними с помощью резиновых прокладок 5 и 13. Герметизация обеспечивается за счет стягивания пакета между массивными плитами 3 и 8 с помощью штанг 7. Такие аппараты приспособлены для быстрой разборки и сборки, и вся их теплообменная поверхность доступна для очистки. Эта особенность важна, например, для аппаратов, применяемых в пищевой промышленности, и позволяет проводить полную его санитарную обработку.

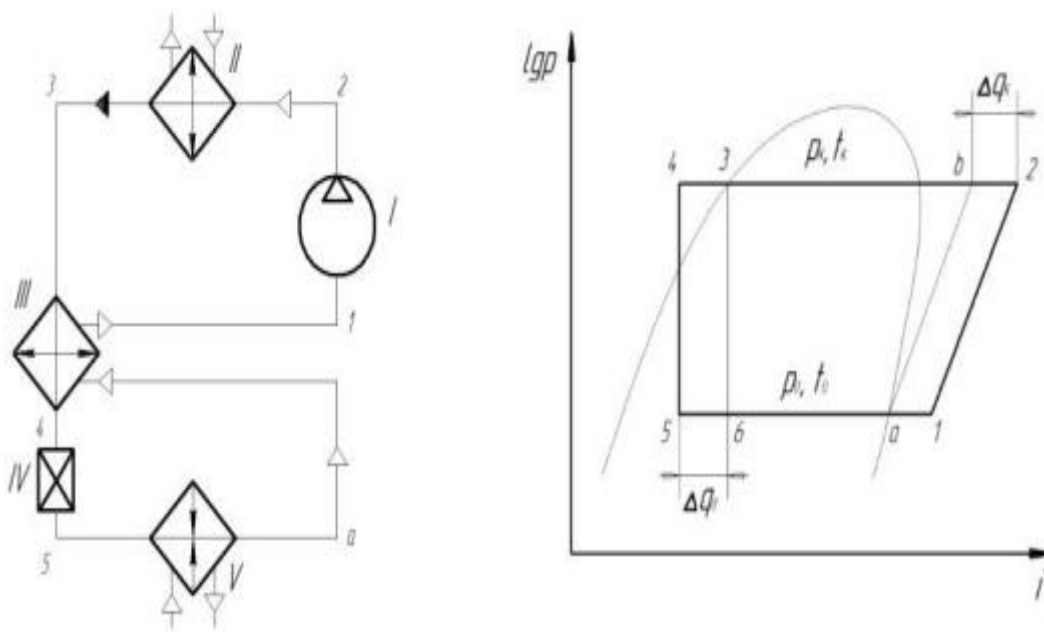


Рисунок 7.1 – Схема и диаграмма работы фреоновой холодильной установки в регенеративном цикле:

I – компрессор; II – конденсатор; III – рекуперативный теплообменный аппарат;
IV – регулирующий вентиль; V – испаритель

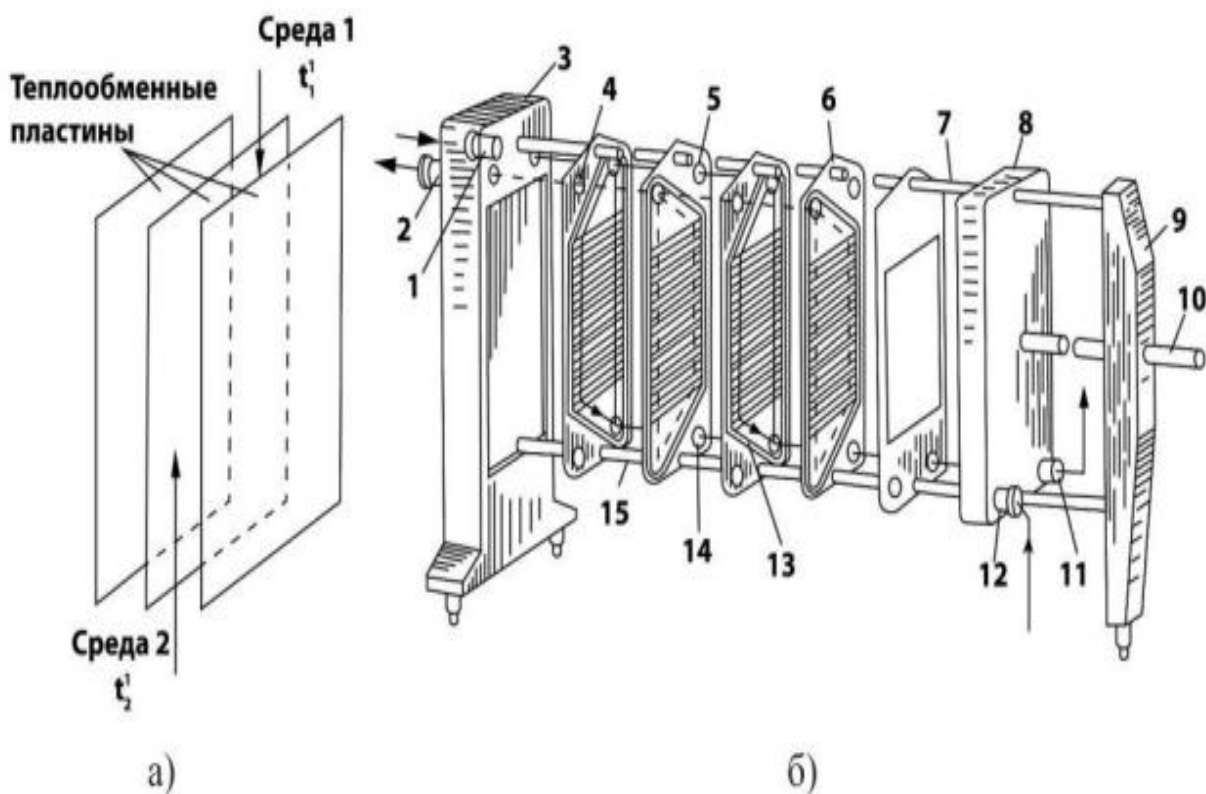


Рисунок 7.2 – Разборный пластинчатый теплообменный аппарат:
 а) схема теплопередающего элемента пластинчатого теплообменника;
 б) схема современного пластинчатого аппарата:

1, 2, 11, 12 – штуцера; 3 – передняя стойка; 4 – верхнее угловое отверстие; 5 – кольцевая резиновая прокладка; 6 – граничная пластина; 7 – штанга; 8 – нажимная плита; 9 – задняя стойка; 10 – винт; 13 – большая резиновая прокладка; 14 – нижнее угловое отверстие; 15 – теплообменная пластина

Простейший теплообменник должен иметь не менее трех пластин, образующих два канала, по одному из которых течет горячая рабочая среда, а по-другому – холодная. В промышленных аппаратах число пластин бывает больше и рабочие среды движутся по множеству параллельных каналов сразу, (рисунок 7.3).

Полу разборные, сварные блочные и сварные неразборные (паянные) теплообменники являются разновидностью аппаратов пластинчатого типа и предназначены для работы при более высоких давлениях рабочих сред. Так паяные рассчитаны на давление до 40 бар.

Рассмотрим конструкцию паяного пластинчатого теплообменного аппарата (рисунок 7.3).

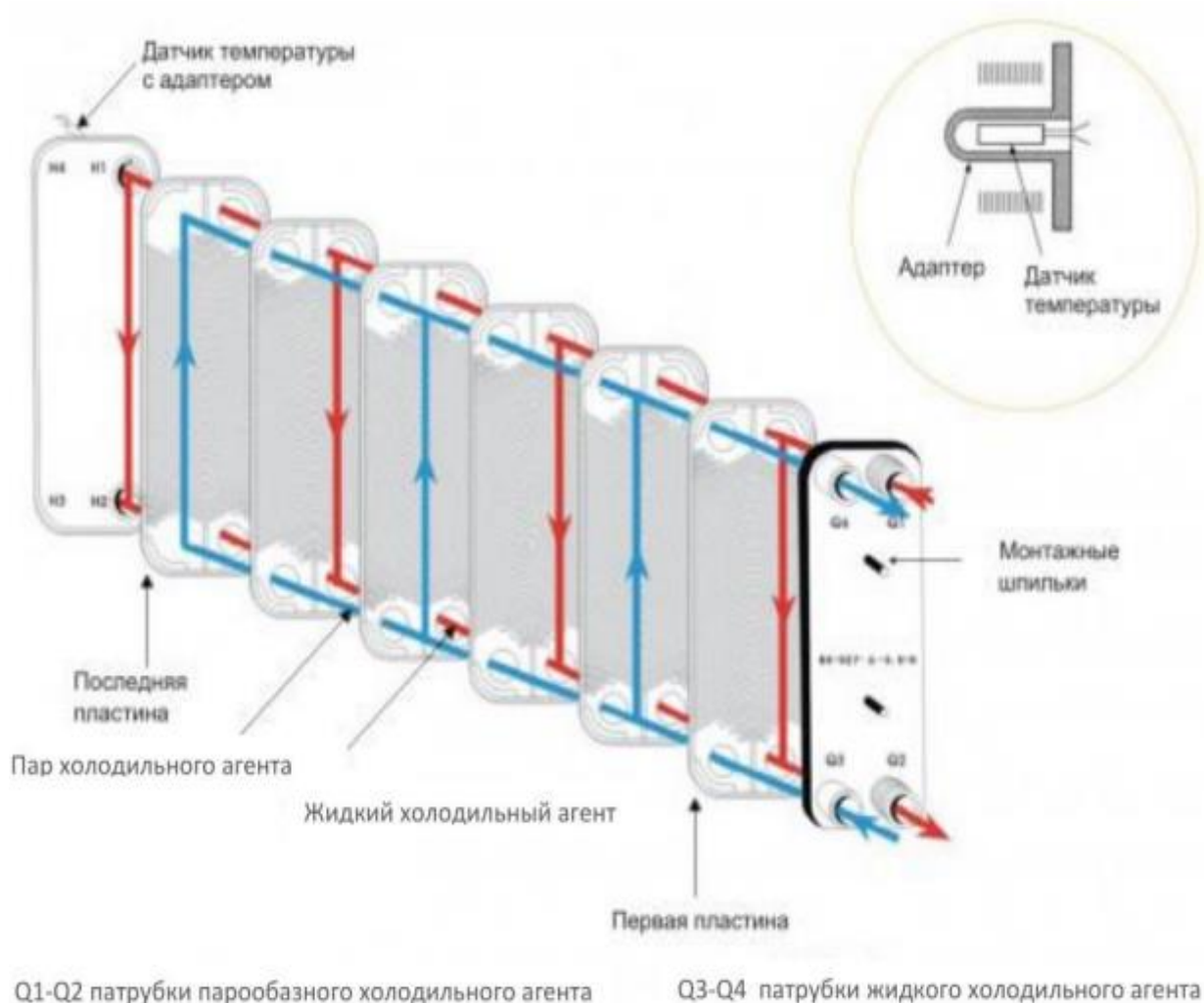


Рисунок 7.3 – Конструкция паяного пластинчатого теплообменного аппарата

Количество пластин – 14 шт;
Площадь теплообмена – 0,168 м².

Паяный теплообменный аппарат пластинчатого типа состоит из рифленых тонкостенных теплообменных пластин из нержавеющей стали, спаянных между собой с помощью медного или никелевого припоя. Между пластинами образуются каналы для прохода теплоносителя. Высокая турбулентность потока и принцип противотока обеспечивают эффективный теплообмен.

Типы пластин и профили их поверхности очень разнообразны. На рисунке 7.4 представлены возможные варианты используемых пластин в пластинчатых теплообменных аппаратах.

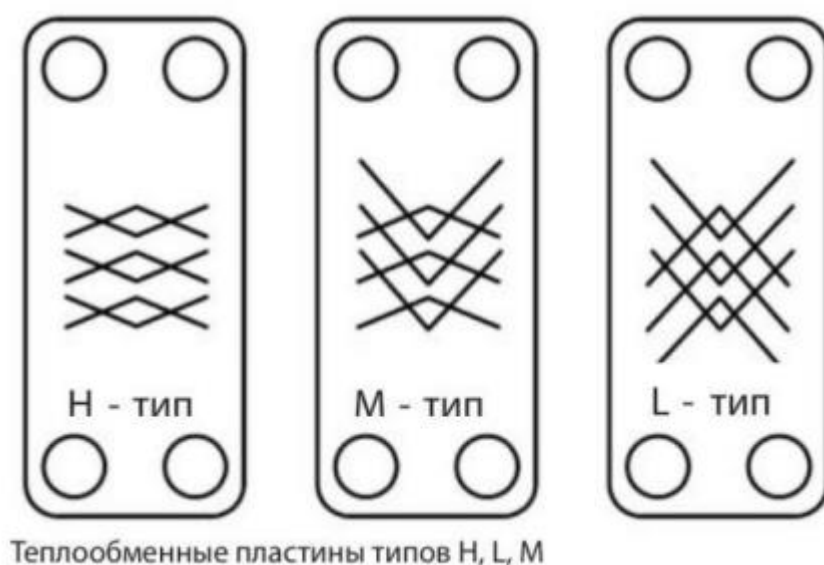


Рисунок 7.4 – Типы пластин теплообменных аппаратов

Уже на основании общего принципа конструирования пластинчатого теплообменника можно сделать заключение о некоторых его особенностях, весьма важных для практики. Малая толщина пластин и параллельная расстановка с малыми промежутками между пластинами позволяет разместить в пространстве рабочую поверхность теплообменника наиболее компактно с такой «плотностью», которая недостижима в других типах жидкостных теплообменников. Это, в конечном счете, приводит к тому, что пластинчатые теплообменные аппараты обладают при равной тепловой нагрузке значительно меньшими габаритными размерами и металлоемкостью, чем аппараты типа «труба в трубе», кожухотрубные и другие, обладающие достаточно высокой эффективностью теплообмена.

Так же необходимо отметить, что противоточная схема циркуляции в аппарате (см. рисунок 7.3, потоки направлены навстречу друг другу) будет более эффективной чем прямоточная. Критерием для эффективности служит величина среднего температурного напора $A_{\text{теп}} (0)$, в противоточной схеме она во многих случаях оказывается больше, чем в прямоточной. Следовательно, поверхность теплообмена при противоточной схеме движения будет меньше, чем в прямоточной. Значит, при прочих равных условиях он будет более компактным, затраты материала на его изготовление наименьшими. Это вытекает из формулы:

$$F = \frac{Q_{\text{т}}}{K \cdot \Delta t_{\text{ср}}} = \frac{Q_{\text{т}}}{K \cdot \theta}, \quad (7.1)$$

где, $Q_{\text{т}}$ – тепловая нагрузка на теплообменный аппарат;

K – коэффициент теплопередачи;

$t_{\text{ср}} (\theta)$ – температурный напор.

Кроме того, при осуществлении противотока можно получить более высокую конечную температуру, чем при прямотоке.

Для того, чтобы спроектировать теплообменник с наименьшими затратами материала на единицу переносимой в нем теплоты, нужно выбрать

такую компоновку и так организовать движение сред, что бы площадь поверхности теплообмена F была наименьшей. Из формулы 7.1 следует, что для этого нужно добиться обеспечения в теплообменном аппарате наибольших Δt_{cp} (Θ) и K . Способы повышения Δt_{cp} (Θ) были рассмотрены выше. Теперь рассмотрим возможности повышения коэффициента теплопередачи K .

Определяющей особенностью устройства пластинчатых теплообменных аппаратов является конструкция и форма поверхности теплообмена и каналов для рабочей среды. Поверхность теплообмена образуется из отдельных пластин, а каналы для рабочей среды имеют щелевидную форму. Рабочая среда движется у поверхности теплообмена тонким слоем, что способствует интенсификации процесса теплоотдачи соответственно коэффициентов теплоотдачи α . А так как

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \Sigma \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (7.2)$$

то это приводит и увеличению K .

На коэффициент теплопередачи также влияет термическое сопротивление

стенки $\Sigma \frac{\delta}{\lambda} = \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}$ – и в этой зависимости определяющим является термическое сопротивление загрязнений δ/λ , поэтому в процессе эксплуатации теплообменных аппаратов необходимо своевременно производить чистку теплообменной поверхности, вовремя удалять водяной камень или другие загрязнения. В полу разборных и паянных аппаратах нельзя допускать условий для образования внутренних загрязнений.

Последовательность выполнения работы

В работе будут задействованы следующие основные устройства: компрессор (КМ), воздухоохладитель (ВО), воздушный конденсатор (КД2), соленоидный клапан (1СВ), терморегулирующий клапан (ТРВ1), рекуперативный теплообменник (ТО).

1. Ознакомиться со схемой экспериментальной установки и расположением приборов можно на рисунке 1, приложение А. Составить описание и заготовить таблицы для регистрации результатов испытаний.

2. Подключить стенд к сети 220 В.

3. Подключить автоматизированный стенд к USB разъему компьютера.

4. Открыть клапаны ЗВ4, ЗВ, ЗВ9.

5. Закрыть РВ, ЗВ1, ЗВ3, ЗВ5, ЗВ8, ЗВ10, ЗВ11.

6. Проверить кнопка «Воздухоохладитель-Испаритель» должна находиться в положении – «Воздухоохладитель». ВК4 – включен, регулятор скорости РС установить на max, ВК5 и ВК6 – выключены.

7. Выставить температуру в камере $t_{хк} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, с помощью терморегулятора РТ.

8. Включить холодильную установку однополюсным QF1 «Сеть 220 В».

9. Включить ВК1 – компрессор и ВК3 – воздухоохладитель. ВК2 должен быть выключен.

10. Запустить программу Пуск → Программы → MeasLAB Explorer.

11. При включении компьютерной системы измерения клавишей «Старт» в программе на цифровых индикаторах лицевой панели отображаются мгновенные значения температур, измеряемых всеми датчиками, и графики их изменения по времени

12. При установившемся режиме снять показания и занести их в таблицу 7.1.

13. После снятия замеров кнопку «Воздухоохладитель-Испаритель» перевести в среднее положение, подождать отключения компрессора, по давлению всасывания, выключить АВ «Сеть 220 В».

Обработка результатов

По данным замеров работы холодильной установки (см. таблицу 7.2) построить цикл работы в диаграмме $I_{gr}-i$ для соответствующего холодильного агента. Параметры узловых точек занести в таблицу 7.1.

Определить для простейшего и регенеративного циклов:

- удельную массовую холодопроизводительность, для простейшего цикла, кДж/кг

$$q_o = i_a - i_b \quad (7.3)$$

- для регенеративного цикла

$$q_o = i_a - i_5, i_5 = i_4 \quad (7.4)$$

- определить из теплового баланса теплообменного аппарата П(ТО), удельную объемную холодопроизводительность, кДж/м³,

$$q_v = \frac{q_o}{v_1}, \quad (7.5)$$

где, v_1 – удельный объем пара в точке всасывания.

Таблица 7.1 – Протокол вычислений

№	t, С	P, МПа	i, кДж/кг	v, м ³ /кг
a				
1				
2				
b				
3				
4				
5				
6				

Холодопроизводительность, кВт

$$Q_o = V_h \cdot q_v \cdot \lambda, \quad (7.6)$$

где $V_h = 0,43 \times 10^{-3}$ м³/с, объем, описываемый поршнями компрессора, установленного на стенде;

λ – коэффициент подачи определяется по графику (см. рисунок 4.7).

Расход холодильного агента,

$$G_a = \frac{Q_o}{q_o} \quad (7.7)$$

Тепловую нагрузку на рекуперативный теплообменный аппарат,

$$Q_T = G_a (i_l - i_a) \quad (7.8)$$

Действительный холодильный коэффициент,

$$\varepsilon = \frac{Q_o}{N_e}, \quad (7.9)$$

где $N_e = N_{эл}$ - мощность, затрачиваемая компрессором.

Полученные значения занести в таблицы 7.2.

Таблица 7.2 – Протокол результатов измерений и вычислений

№ п/п	Измеряемые величины				Определяемые величины						
					простейший цикл			регенеративный цикл			
	t_0, C	$t_{\text{к}}, \text{C}$	$t_{\text{вс}}, \text{C}$	$N_{\text{эл}}, \text{кВт}$	$q_0, \text{кДж/кг}$	$Q_0, \text{кВт}$	ε	$q_0, \text{кДж/кг}$	$Q_0, \text{кВт}$	$Q_T, \text{кВт}$	ε
1											

Контрольные вопросы

1. Классификация пластинчатых теплообменных аппаратов.
2. Характеристика и различия простейшего и регенеративного цикла.
3. Преимущества пластинчатых теплообменных аппаратов.
4. Функция рекуперативного теплообменного аппарата в холодильной установке.
5. Преимущества не разборных пластинчатых теплообменных аппаратов.
6. Характеристика и особенности противоточной схемы циркуляции.
7. Факторы, оказывающие влияние на коэффициент теплопередачи.

Практическая работа № 8. Изучение конструкции водяного конденсатора и определение его коэффициента теплопередачи

Цель работы: формирование практических умений и навыков в вопросах теплопередачи и экспериментального исследования работы водяного конденсатора.

Задачи работы

1. Изучение конструкции водяного конденсатора.
2. Испытание водяного конденсатора при работе холодильной машины для определения его коэффициента теплопередачи.
3. Сравнить коэффициенты теплопередачи водяного и воздушного конденсаторов.

Краткие теоретические сведения

В зависимости от охлаждающей среды конденсаторы можно разделить на следующие группы: с воздушным охлаждением; с жидкостным, преимущественно водяным, охлаждением; с водо-воздушным; с охлаждением кипящим холодильным агентом, конденсатор – испарители.

Как уже отмечалось в практической работе № 6, в целях экономии пресной воды все чаще осуществляется переход от конденсаторов с водяным охлаждением к воздушным. Однако в крупных установках для уменьшения площадей, занимаемых конденсаторами и понижения температуры конденсации t_k , широкое применение нашли водяные конденсаторы. Почему же водяные конденсаторы занимают меньшую площадь? Какие факторы влияют на площадь?

Как известно основной характеристикой любого теплообменного аппарата является его площадь поверхности F . Проанализируем формулу:

$$F = \frac{Q_k}{K \cdot \theta}; \quad (8.1)$$

Для того, чтобы поверхность была меньше, при прочих равных условиях необходимо иметь больший коэффициент теплопередачи K .

Коэффициент теплопередачи K характеризует интенсивность передачи теплоты и численно равен количеству теплоты, которое передается в единицу времени через единицу поверхности стенки при разности температур между средами в один градус.

Как известно для плоской стенки

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (8.2)$$

Если не учитывать термическое сопротивление стенки $\sum \frac{\delta}{\lambda}$ то термическое сопротивление перехода теплоты от рабочих сред к стенке $\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}$ можно представить в виде $\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\alpha_1 \cdot \alpha_2}$

пусть, например, $\alpha_1 > \alpha_2$, тогда из предыдущей формулы следует, термическое сопротивление можно значительно уменьшить только увеличивая меньший коэффициент теплоотдачи α_2 .

Учитывая, что теплофизические свойства воды значительно лучше, чем у воздуха, коэффициент теплоотдачи к воде будет значительно выше, чем к воздуху. Следовательно, и коэффициент K при прочих равных условиях в водяных конденсаторах будет выше, чем в воздушных. Для подтверждения

проведем экспериментальное исследование водяного конденсатора и сравним с результатами испытаний воздушного конденсатора из практической работы №6.

Определение коэффициентов теплоотдачи является довольно сложной задачей и основывается на критериальных уравнениях.

Так, например, при конденсации фреонов внутри горизонтальных медных труб Н. Ф. Чопко предлагает следующую формулу:

$$Nu = 0,68 (Ga \cdot K \cdot Pr)^{0,25}, \quad (8.3)$$

где K – критерий фазового перехода, $K = \gamma / (c_p \times \Theta)$,

где в свою очередь γ – скрытая теплота парообразования;

c_p – теплоемкость; $\Theta = t_k - t_{ст}$.

Для конденсирующегося холодильного агента возникают дополнительные трудности, связанные с тем, что не известна температура стенки ст. Все теплофизические свойства для конденсирующегося пара принимаются при температуре конденсации t_k для насыщенной жидкости, т.к. пленка конденсата будет создавать основное термическое сопротивление.

Ознакомиться с конструкцией водяного конденсатора на базе пластинчатого теплообменника (рисунок 8.1):

Устройство теплообменника пластинчатого паяного:

Количество пластин – 14 шт;

Площадь теплообмена – 0,168 м²;

Рабочее давление сред до 30 бар;

Рабочая температура от -196 °С до 200 °С

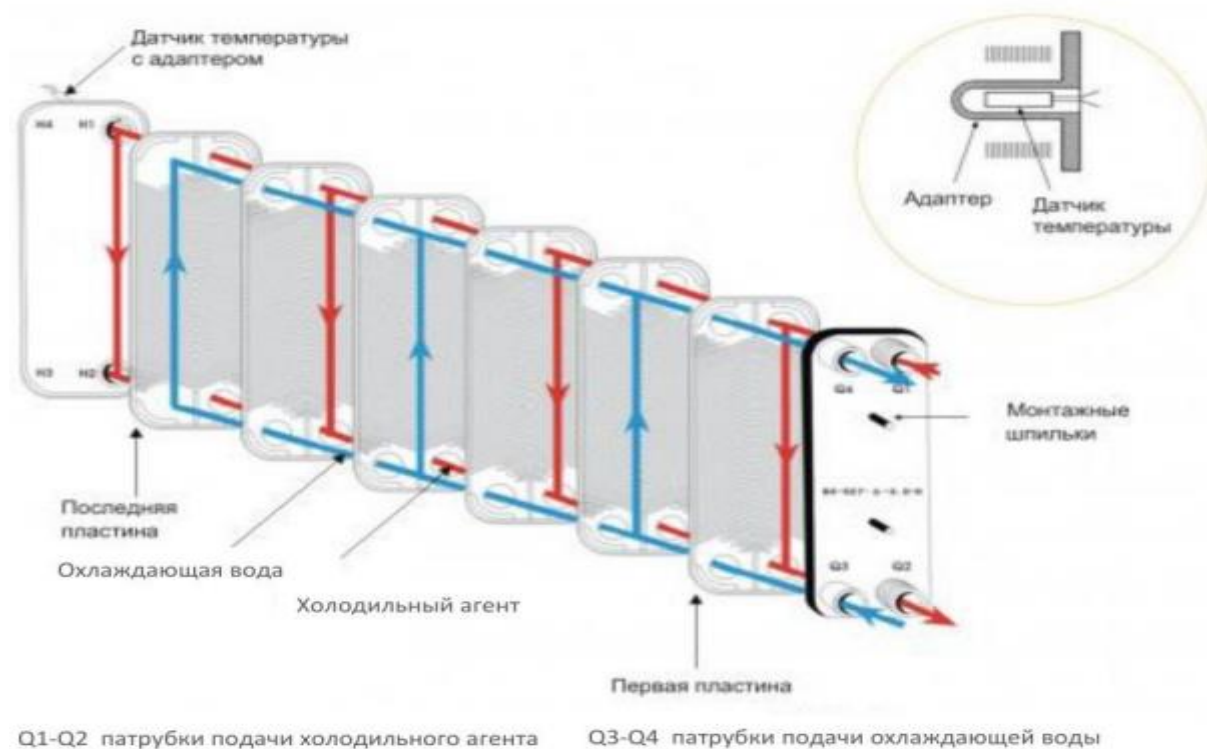


Рисунок 8.1 – Устройство пластинчатого водяного конденсатора

Аппарат паяный пластинчатого типа состоит из рифленых тонкостенных теплообменных пластин из нержавеющей стали, спаянных между собой с 77 помощью медного или никелевого припоя (для аммиачных холодильных установок). Между пластинами образуются каналы для прохода холодильного агента и воды. Высокая турбулентность потока обеспечивает эффективный теплообмен.

Типы пластин и профили их поверхности очень разнообразны. На рисунке 8.2 представлены возможные варианты используемых пластин в пластинчатых теплообменных аппаратах.

Теплообменные пластины типа Н

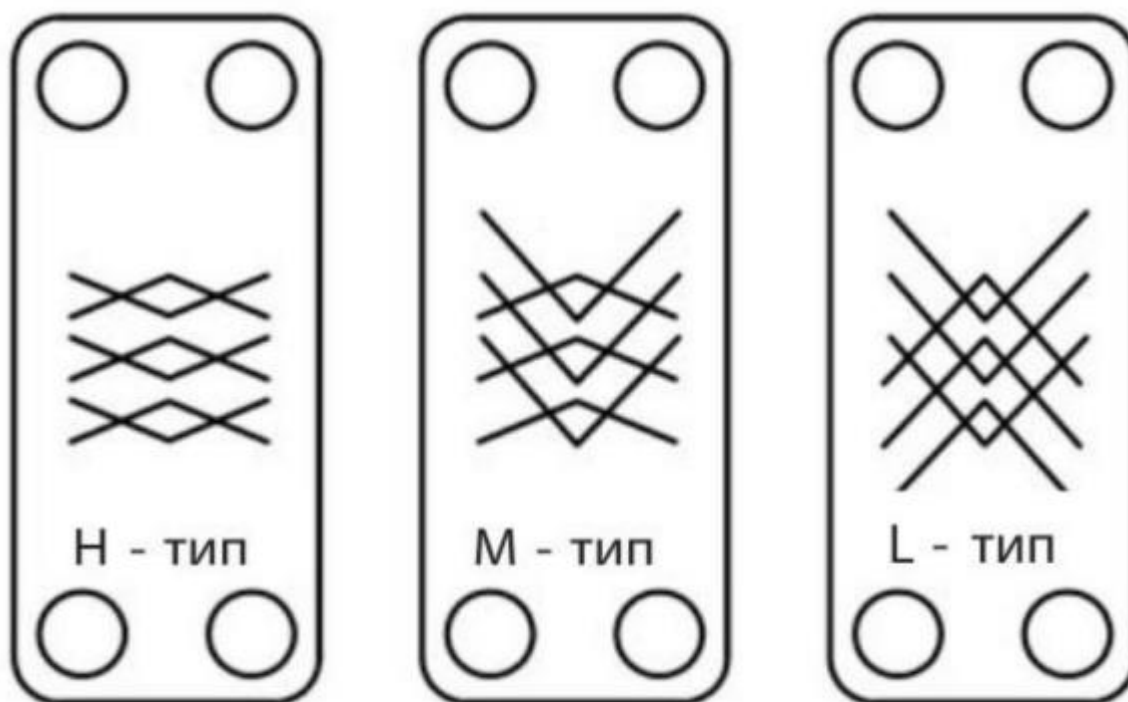
Каналы в пластинах этого типа расположены под тупым углом, что позволяет получить большую эффективность теплообмена и увеличить турбулентность потока жидкости.

Теплообменные пластины типа L

Каналы в пластинах этого типа расположены под острым углом, что позволяет уменьшить падение давления, однако при этом понижается турбулентность потока жидкости и эффективность теплообмена.

Теплообменные пластины типа М

В теплообменнике комбинируются пластины типов L и H-типов. Такое решение применяется в системах, где температура жидкости в одном контуре пластинчатых теплообменников изменяется гораздо больше, чем в другом.



Теплообменные пластины типов Н, L, М

Рисунок 8.2 – Типы пластин теплообменных аппаратов

Последовательность выполнения работы

В работе будут задействованы следующие основные устройства: компрессор (КМ), воздухоохладитель (ВО), водяной конденсатор (КД1), соленоидный вентиль (1СВ), терморегулирующий вентиль (ТРВ1), рекуперативный теплообменник (ТО).

1. Ознакомиться со схемой экспериментальной установки и расположением приборов можно на рисунке 1, приложение А. Составить описание и заготовить таблицы для регистрации результатов испытаний.

2. Подключить стенд к сети 220 В.

3. Подключить автоматизированный стенд к USB разьему компьютера.

4. Открыть вентили 3В4, 3В6, 3В8, 3В10.

5. Закрыть РВ, 3В1, 3В3, 3В5, 3В9 (оставить приоткрытым на 14 оборота), 3В11.

6. Проверить кнопка «Воздухоохладитель-Испаритель» должна находиться в положении – «Воздухоохладитель». ВК4, ВК5 и ВК6 – выключены

7. Выставить температуру в камере $t_{\text{жк}} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, с помощью терморегулятора РТ.

8. Включить холодильную установку однополюсным QF1 «Сеть 220 В».

9. Включить ВК1 – компрессор и ВК3 – воздухоохладитель. ВК2 должен быть выключен.

10. Запустить программу Пуск – Программы → MeasLAB Explorer.

11. При включении компьютерной системы измерения клавишей «Старт» в программе на цифровых индикаторах лицевой панели отображаются мгновенные значения температур, измеряемых всеми датчиками, и графики их изменения по времени

12. Регулируя подачу воды вентилем 3В10, поступающей на охлаждение в конденсатор КД1, добиться установления температура конденсации к примерно равной к режиму № 1, опыт 1 в практической работе № 6. В установившемся режиме снять параметры работы установки, результаты занести в таблицу 8.1 (раздел – водяной конденсатор). При необходимости опыт можно повторить.

13. После снятия замеров кнопку «Воздухоохладитель-Испаритель» перевести в среднее положение, подождать отключения компрессора, по давлению всасывания, выключить QF1 «Сеть 220 В».

Обработка результатов

Тепловая нагрузка на конденсатор определяется по формуле, Вт

$$Q_K = G_w \cdot c_p (t_w^{\text{ВЫХ}} - t_w^{\text{ВХ}}), \quad (8.4)$$

где $G_w = V_w \cdot \rho$ массовый расход воды через конденсатор, кг/с;

V_w – объемный расход воды через конденсатор КД1 (КД), м³/с;

c_p – теплоемкость воды, Дж/(кг К);

ρ – плотность воды, кг/м³;

c_p и ρ – берутся при средней температуре воды в конденсаторе.

$$t_{\text{ср}} = (t_w^{\text{ВХ}} + t_w^{\text{ВЫХ}})/2 \quad (8.5)$$

Коэффициент теплопередачи k определяется по формуле, Вт/(м² К)

$$K = Q_K / (F \cdot \theta) = Q_K / (F \cdot \Delta t_{cp}) \quad (8.6)$$

где Δt_{cp} (°C), температурный напор определяется в зависимости:

Если величины $\Delta t_6 = t_k - t_w^{BX}$ и $\Delta t_m = t_k - t_w^{ВЫХ}$ незначительно отличаются друг от друга, а их отношение $\Delta t_6 / \Delta t_m < 2$, то средний температурный напор можно определить из выражения

$$\Delta t_{cp} = (\Delta t_6 + \Delta t_m) / 2 \quad (8.7)$$

Контрольные вопросы

1. Конструктивные особенности пластинчатого водяного конденсатора.
2. Типы пластин теплообменных аппаратов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Холодильные технологии и технологическое оборудование пищевой промышленности: учеб. пособие / А. М. Ибраев [и др.]. – Казань: ФЭн, 2012. – 255 с.
2. Примеры и задачи по холодильной технологии пищевых продуктов. Ч. 1 / В. Е. Куцакова [и др.]. – Москва: Колос, 2011. – 136 с.
3. Радченко, Н. И. Анализ эффективности охлаждения воздуха на входе газотурбинных двигателей в жарких климатических условиях / Н. И. Радченко, Р. Эльгерби, Р. Эльгерби // Газотурбинные технологии: специализирован. информ. аналит. журн. – 2013. – N 4. – С. 34–39
4. Примеры и задачи по холодильной технологии пищевых продуктов. Ч. 3. Теплофизические основы. – Москва: КолосС, 2004. – 249 с.
5. Мещеряков, Ф. Е. Основы холодильной техники и холодильной технологии / Ф. Е. Мещеряков. – Москва: Пищевая промышленность, 2005. – 560 с.
6. Свердлов, Г. З. Курсовое и дипломное проектирование холодильных установок и систем кондиционирования воздуха / Г. З. Свердлов, Б. К. Явнель. – Москва: Пищевая промышленность, 2012. – 264 с.
7. Шавра, В. М. Основы холодильной техники и технологии пищевых отраслей промышленности / В. М. Шавра. – Москва: Дели принт, 2002. – 126 с.
8. Большаков, С. А. Холодильная техника и технология пищевых продуктов: учебник / С. А. Большаков. – Москва: ИЦ «Академия», 2003. – 304 с.
9. Быков, А. В. Холодильные компрессоры: справочник / А. В. Быков. – Москва: Легкая и пищевая промышленность, 2001. – 280 с.
10. Теплообменные аппараты холодильных установок / Г. Н. Данилова [и др.]. – Ленинград: Машиностроение. Ленингр. отд., 2000. – 303 с.
11. Полугерметичные поршневые компрессоры Frascold: каталог. – Киев: ТЕКО, 2005. – 34 с.
12. Полугерметичные винтовые компрессоры Frascold: каталог. – Киев: ТЕКО, 2005. – 14 с.
13. Теплообменная аппаратура: каталог продукции ЕСО. – Киев: ТЕКО, 2005. – 54 с
14. Голянд, М. М. Холодильное технологическое оборудование / М. М. Голянд, Б. Н. Малеванный. – Москва: Пищевая промышленность, 2007. – 335 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Обоз.	Наименование
KM	Компрессор
KП1	Конденсатор боковой
KП2	Конденсатор воздушный
ВО	Воздухоохладитель
И	Испаритель
ТО	Теплообменник
ОЖ	Отделитель жидкости
РЛ	Ресивер линейный
ФО	Фильтр осушитель
CC1, CC2	Смотровые стекла
ТРВ1, ТРВ2	Терморегулирующий вентиль
РВ	Регулирующий вентиль
РМ1, РМ2	Ротаметр
Н	Насос
1CB, 2CB	Сolenoidный вентиль
НЗ	Нагреватель электрический
N	Нагревательный элемент
У	Уравнительный бак
Р11	Манометр P ₀ (1Н)
Р12	Манометр P _к (1В)
М	Электродвигатель
ЗВ1-ЗВ12	Запорный вентиль
ЗЖ	Запорный клапан (шредер)

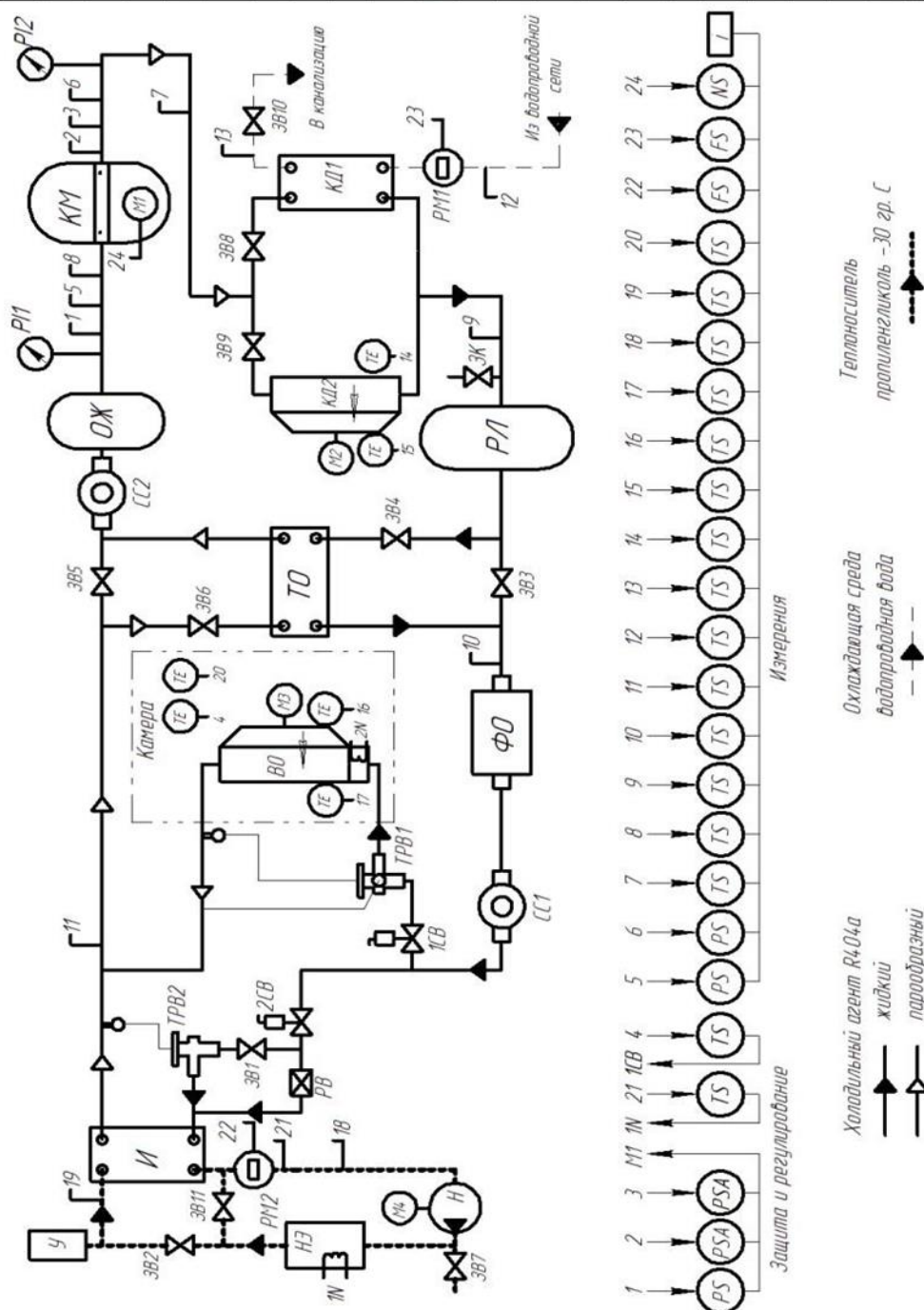


Рисунок 1 – Схема лабораторной установки ПАХП-ХМ-Р

Приложение Б

Таблица параметров измерения ПАХП-ХМ-Р

5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
p_o	p_k	t_n	t_{bc}	t_k	t_{Π}	t_o	t_w^{BX}	$t_w^{BЫX}$	t_{B3}^{BX}	$t_{B3}^{BЫX}$	t_B^{BX}	$t_B^{BЫX}$	$t_{TЛ}^{BX}$	$t_{TЛ}^{BЫX}$

20	22	23	24
$t_{\text{ХК}}$	$V_{TЛ}$	V_w	$N_{\text{эл}}$

p_o – давление кипения;

p_k – давление конденсации;

t_n – температура нагнетания;

t_{bc} – температура всасывания;

t_k – температура конденсации;

t_{Π} – температура переохлаждения;

t_o – температура кипения;

t_w^{BX} – температура воды на входе в конденсатор КД1;

$t_w^{BЫX}$ – температура воды на выходе из конденсатора КД1;

t_{B3}^{BX} – температура воздуха на входе в конденсатор КД2;

$t_{B3}^{BЫX}$ – температура воздуха на выходе из конденсатора КД2;

t_B^{BX} – температура воздуха на входе в воздухоохладитель ВО;

$t_B^{BЫX}$ – температура воздуха на выходе из воздухоохладителя ВО;

$t_{TЛ}^{BX}$ – температура теплоносителя на входе в испаритель И;

$t_{TЛ}^{BЫX}$ – температура теплоносителя на выходе из испарителя И;

$t_{\text{ХК}}$ – температура воздуха в камере;

$V_{TЛ}$ – расход теплоносителя;

V_w – расход охлаждающей воды;

$N_{\text{эл}}$ – мощность затрачиваемая в компрессоре.

Локальный электронный методический материал

Нина Анатольевна Фролова

ХОЛОДИЛЬНАЯ ТЕХНИКА В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Редактор С. Кондрашова
Корректор Т. Звада

Уч.-изд. л. 5,1. Печ. л. 4,1.

Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Калининградский государственный технический университет»
236022, Калининград, Советский проспект, 1