



Основы термодинамики. Принципы работы тепловых машин

Дисциплина
Общая энергетика

доцент ОЭЭ
Шестакова Вера Васильевна

Центральное электроснабжение – есть ли альтернатива?



Свист на трубопроводе



Трубы теплопередачи тянутся на десятки км...



Ремонт, ремонт...

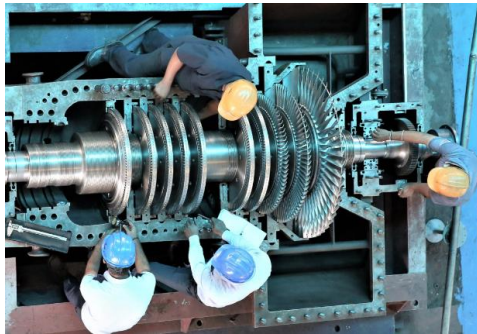


Накипь в трубах
теплоснабжения

Тепловые машины

Тепловые двигатели

Используют теплоту получаемую при сгорании топлива для преобразования в механическую энергию поступательного или вращательного движения



Паровая турбина

Термокомпрессоры (тепловые насосы)

Кондиционер -
воздушный тепловой
насос



Тепловые насосы -
устройства для
переноса тепловой
энергии от
низкопотенциальных
источников к
потребителю



Холодильники –
устройства,
поддерживающее
низкую температуру
в
теплоизолированной
камере за счет
переноса тепла из
камеры во внешнюю
среду

Физические процессы, на которых основан принцип действия тепловых насосов



Конденсация



Конденсатор

Компрессор

Испаритель



Испарение



Расширение



Сжатие

Дроссельный
вентиль

3

4

2

1

Источники низкопотенциальной теплоты для испарителя

Аккумуляторы теплоты в природе

Грунт

Грунтовые воды

Водоемы

Воздух в атмосфере (для теплого климата)



Аккумуляторы теплоты в промышленности

Охлаждающая вода в градирнях и водоемах ТЭС

Дымовые газы заводов и ЭСТ

Сточные воды

Охлаждающие системы электрических машин (масло в трансформаторах)

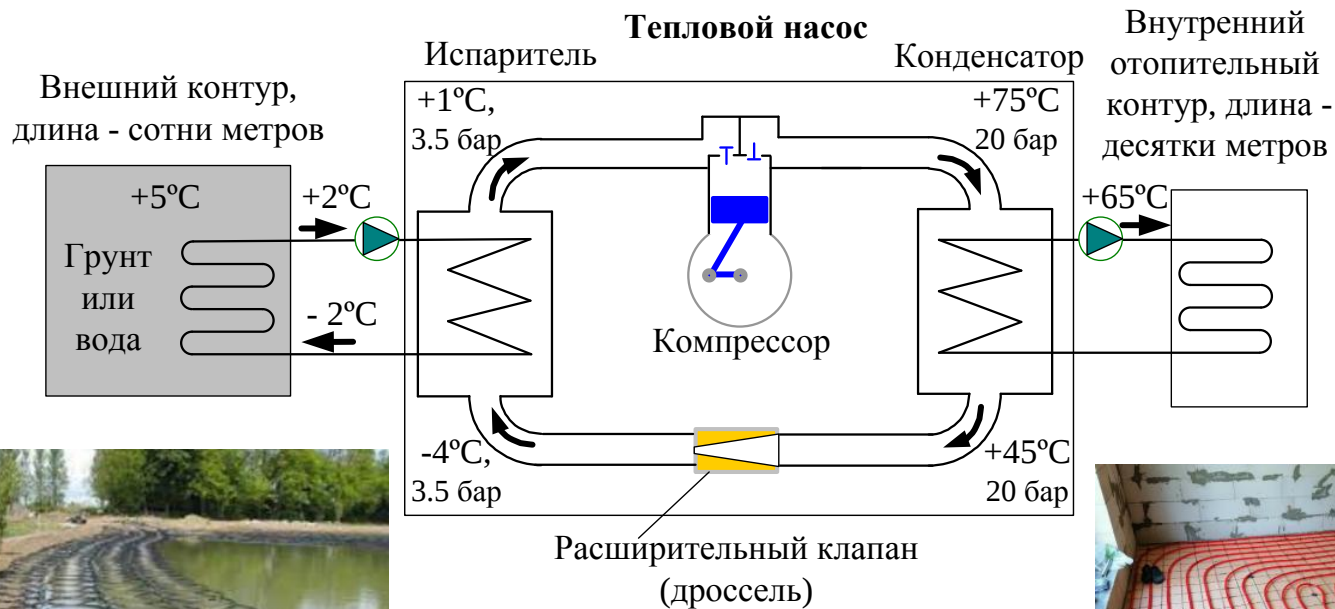
Помещения с греющимися установками (серверные)

Навоз на фермах

Гидравлические прессы....

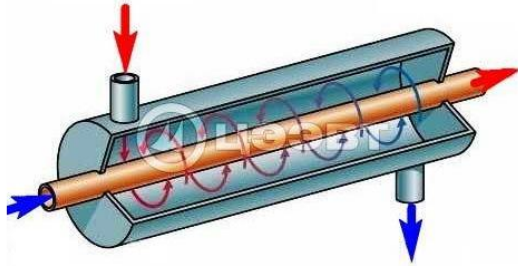


Схема теплового насоса

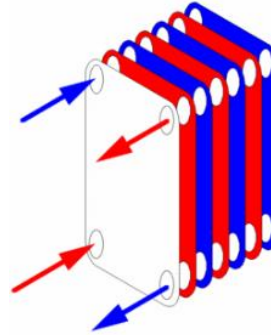


Теплообменник

техническое устройство, в котором осуществляется теплообмен между двумя средами, имеющими различные температуры



Теплообменник «труба в трубе»



Пластинчатый теплообменник

Рекуперация - возвращение энергии для дальнейшего использования в том же процессе.

Принцип теплообмена: два теплоносителя двигаются сквозь теплообменник, и тепло передаётся от одного к другому через стенки труб. Таким образом, один теплоноситель теряет тепло, другой нагревается, но температура стенок труб остаётся в целом неизменной (имеет место рекуперация).



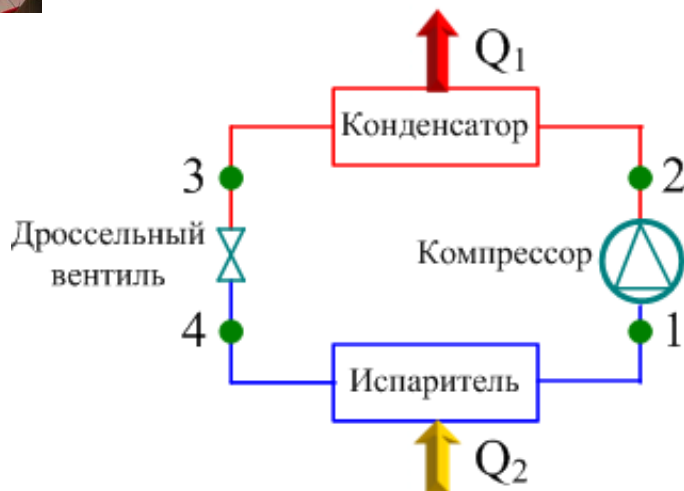
Преимущества ТН

- Невысокие энергозатраты - на 1 кВт/ч электроэнергии придется 5 кВт тепловой энергии.
- Не требуется специального ухода.
- Полная автоматизация.
- Экологичность и безопасность. Случайный перегрев устройства невозможен.
- Реверсивный ТН может охлаждать помещение в жаркие дни.
- Период эксплуатации - до 50 лет.

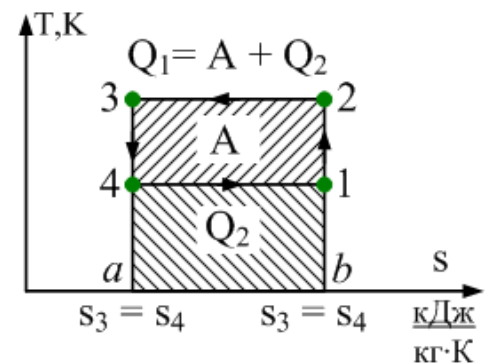
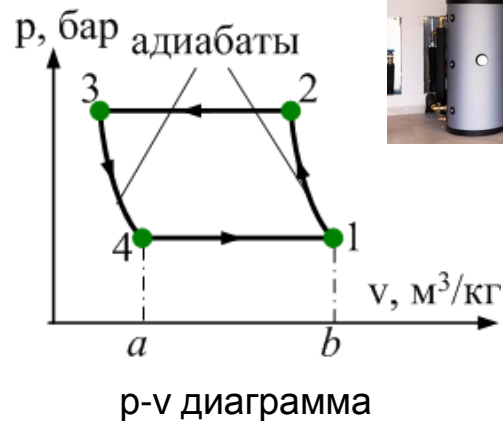
Недостатки ТН

- Цены - от 500 000 рублей. Окупаемость не менее 5-9 лет.
- Сложный монтаж внешнего теплообменного контура большой площади (подземный или подводный) и внутреннего (теплый пол)
- Необходимость при температуре ниже минус 15С° дополнительных источников тепла (электрических или газовых).
- Нарушение экосистемы участка. Охлаждение грунта – ухудшение роста растений.

Диаграммы термодинамического цикла



Блок-схема теплового насоса

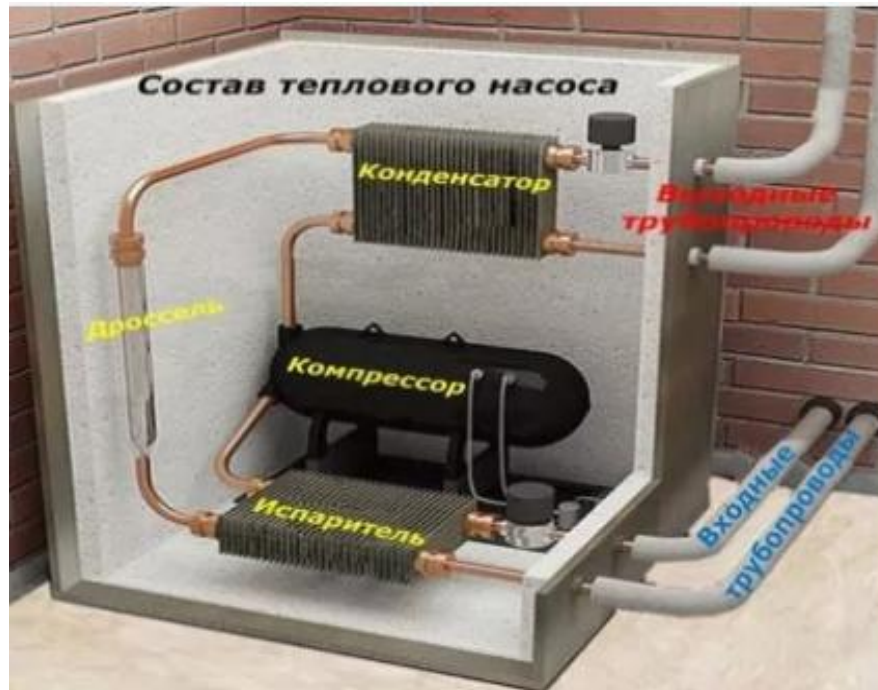


T-s диаграмма

Недостаток p-v, T-s диаграмм - для определения количества тепла Q_1 , Q_2 и затраченной работы A необходимо измерять площади многоугольников.



Конструкция ТН (упрощенно)



Задача 1

Расчет необходимой мощности ТН

Расчет ТН состоит из 3-х этапов.

Этап 1 – выбор необходимой мощности ТН.

Этап 2 – расчет размеров внешнего контура.

Этап 3 – расчет сроков самоокупаемости ТН.

Расчеты производятся для здания с параметрами:

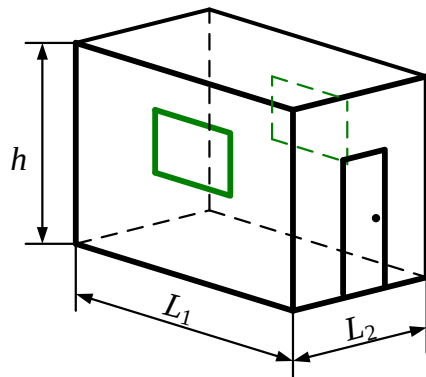
$S = L_1 \cdot L_2$, м² – общая площадь жилых помещений в здании,

$S = S_{\text{пол}} = S_{\text{пот}}$, м² – площадь пола, равная площади потолка здания,

h – м, высота потолка,

$S_{\text{ок}}$, м² – суммарная площадь всех окон,

$S_{\text{дв}}$, м² – площадь входной двери.



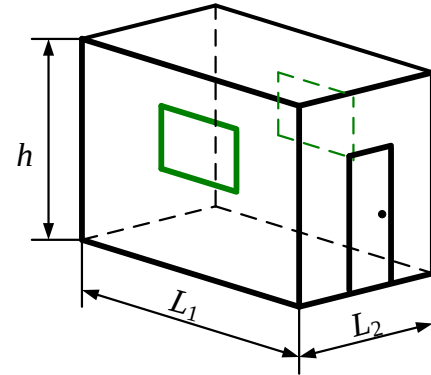
Задача 1

Расчет необходимой мощности ТН

Способ 1. Выбор мощности на основании класса энергоэффективности здания.

Здания делятся по энергоэффективности на 6 классов (таблица 1). На основании общих усредненных расчетов предполагается, что на каждый квадратный метр помещения требуется ΔP мощности ТН.

Тип здания	A++	A+	A	B	C	D
ΔP , кВт/м ²	0,04	0,05	0,06	0,08	0,09	0,1
k	0,4	0,5	0,7	0,8	0,9	1



Задача 1

Расчет необходимой мощности ТН

Способ 2. Выбор мощности на основании расчета теплопотерь здания и максимальной разницы температур снаружи и внутри помещения.

Расчет мощности ТН производится по формуле

Q – кКал/час, теплопотери здания, причем **1 кВт/час = 860 кКал/час**.

k – о.е., коэффициент теплопередачи здания в зависимости от типа здания по энергоэффективности (таблица),

$V = S \cdot h$ – м³, общий объем внутренних жилых помещений в здании,

$T_{\text{вн}}$ – °С, желаемая температура внутри здания в самый холодный период года,

$T_{\text{нар}}$ – °С, температура снаружи в самый холодный период года.

Тип здания	A++	A+	A	B	C	D
ΔP , кВт/м ²	0,04	0,05	0,06	0,08	0,09	0,1
k	0,4	0,5	0,7	0,8	0,9	1

Задача 1

Расчет необходимой мощности ТН

Способ 3. Выбор мощности на основании расчета теплопотерь здания по типовым теплопотерям

Элемент конструкции здания	Потери для зданий различных типов по энергоэффективности		
	<i>A++, A+, A</i> минимальные	<i>B</i> средние	<i>C, D</i> максимальные
Стены, $\Delta P_{\text{ст}}$ Вт/м ²	5	30	55
Окна $\Delta P_{\text{ок}}$ Вт/м ²	30	50	70
Потолок $\Delta P_{\text{пот}}$ Вт/м ²	8	35	50
Пол $\Delta P_{\text{пол}}$ Вт/м ²	2	14	25
Двери $\Delta P_{\text{пол}}$ Вт/м ²	4	15	30

Источники тепла для ТН

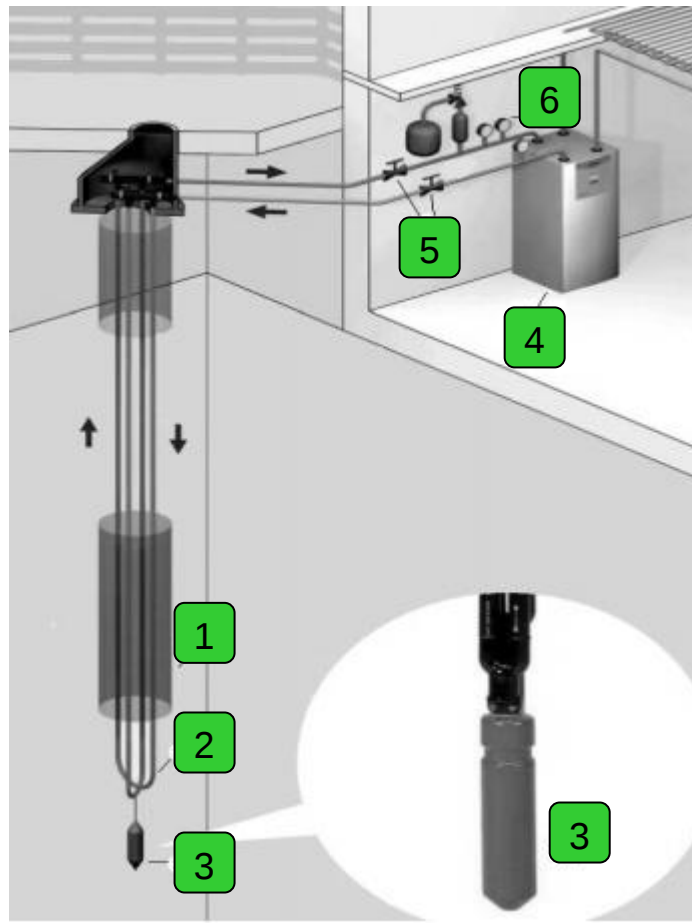
Земляной грунт.

Тепло от Солнца аккумулирует слой около 20 м,
с большей глубины идет тепло земных недр.

- 1 – скважина
- 2 – труба с теплоносителем
- 3 – груз
- 4 – ТН
- 5 – вентили
- 6 – контрольные приборы

Земляной зонд

Скважина диаметром 220 мм.
Глубиной до 200 м.
Скважина засыпается кварцевым песком

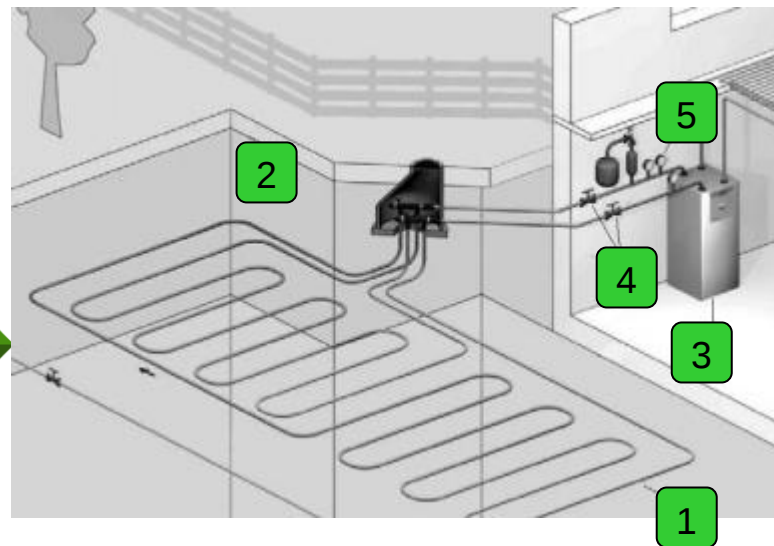


Источники тепла для ТН

Земляной грунт.

- 1 – система трубопроводов с теплоносителем
- 2 – траншея
- 3 – ТН
- 4 – вентили
- 5 – контрольные приборы

Земляной коллектор



Траншея глубиной до 2 м, **большой площади**

Источники тепла для ТН

Грунтовые воды - 8-10 градусов.

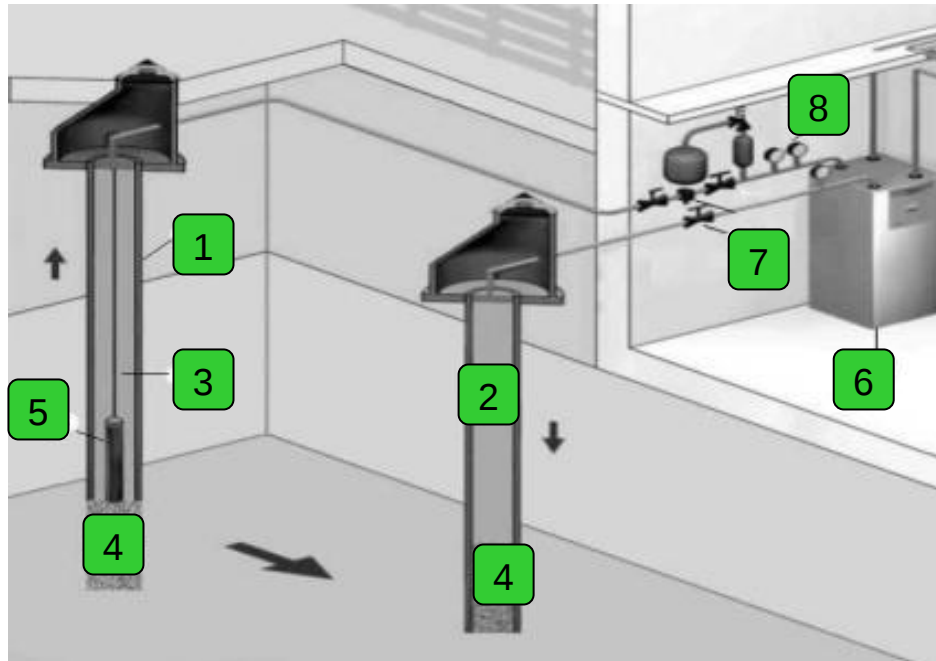
Нет промежуточного теплоносителя

- 1 – всасывающий колодец
- 2 – поглощающий колодец
- 3 – труба
- 4 – фильтры
- 5 – погружной насос
- 6- ТН
- 7 – вентили
- 8 – контрольные приборы



Схема подключения ТН

Глубина залегания вод не более 15 м



Задача 2

Приближенный расчет размеров внешнего горизонтального геотермального контура

Удельный отбор мощности от грунта (влажная глинистая почва) примем $P_{гр} = 0,025$ кВт/м².

На 1 кВт электрической энергии, затраченной на работу компрессора, ТН выдаёт примерно 5 кВт тепловой энергии. Следовательно, мощность потребляемая компрессором ТН равна

$$P_{комп} = P_{ТН}/5.$$

Рассчитайте размеры внешнего контура для ТН с мощностью, определенной в задаче 1.



Задача 3

Приближенный расчет сроков самоокупаемости ТН

Исходные данные

$C_0 = 3.45$ руб/кВт·ч.

$C_{ТН} = 600000$ руб. , $P_{ТН} = 10$ кВт

ТН отапливает здание 8 месяцев в году - $T_{\text{раб}} = 8 \cdot 30 \cdot 24 = 5760$ часов.

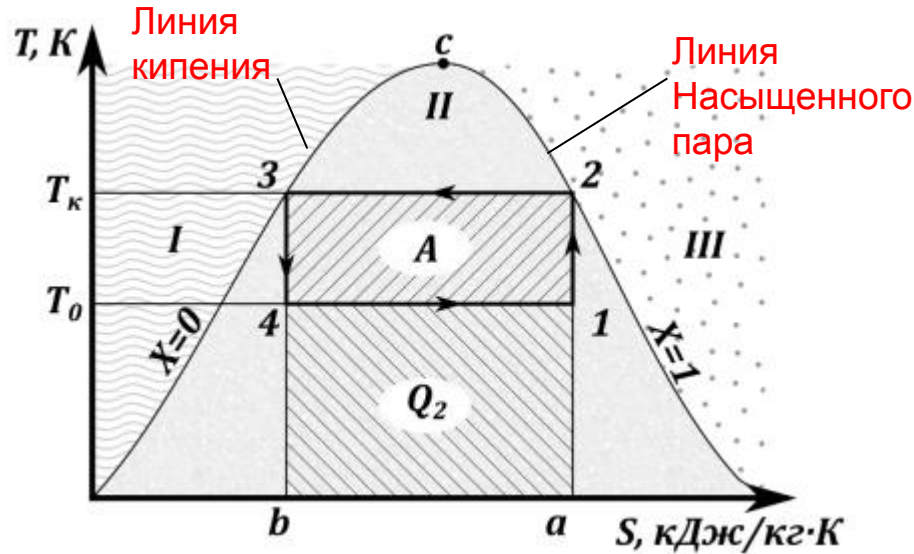
$C_{\text{цт}} = 65000$ руб. за один год - стоимость отопления частного дома за счет центрального теплоснабжения

Определите – время окупаемости ТН с мощностью, определенной в задании 1.

Решение:

Определим стоимость электрической энергии, потраченной на работу компрессора ТН мощностью 10 кВт

Дополнительные пояснения к T - S диаграмме



- I – жидкая фаза хладагента
- II – парожидкостная фаза (хладагент будет в смеси жидкого и газообразного состояния)
- III – газообразная фаза

c – критическая (тройная) точка;

$X = 0$ – линия кипения (насыщения);

$X = 1$ – линия сухого насыщенного пара;

Q_2 – количество тепла, отбираемого хладагентом;

A – затраченная на совершение цикла работа

Основные определения

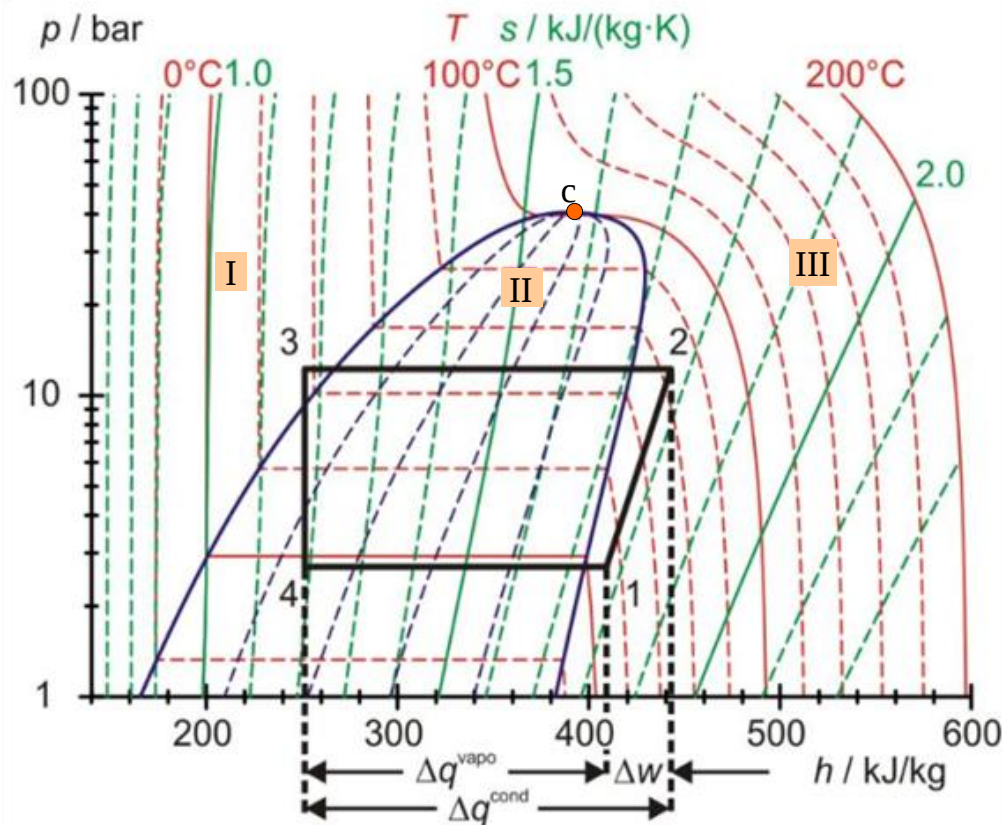
Энтальпия i (кДж/кг)

- свойство вещества, указывающее количество энергии, которую можно преобразовать в теплоту;
- мера теплосодержания рабочей среды (хладагента), которая обычно повышается с увеличением давления и содержания газа.

Термодинамическая энтропия s (кДж/кг·К)

- физическая величина, сопряженная с температурой, зависит от нескольких переменных, используется для описания тепловых процессов в системе;
- характеристика теплового состояния вещества, определяющая наличие и количественную меру теплового воздействия на вещество
- мера необратимого рассеивания энергии или бесполезности энергии (потому что не всю энергию системы можно использовать для превращения в какую-нибудь полезную работу).

Упрощенная диаграмма Моляе



Теоретический цикл
одноступенчатой
компрессионной холодильной
машины

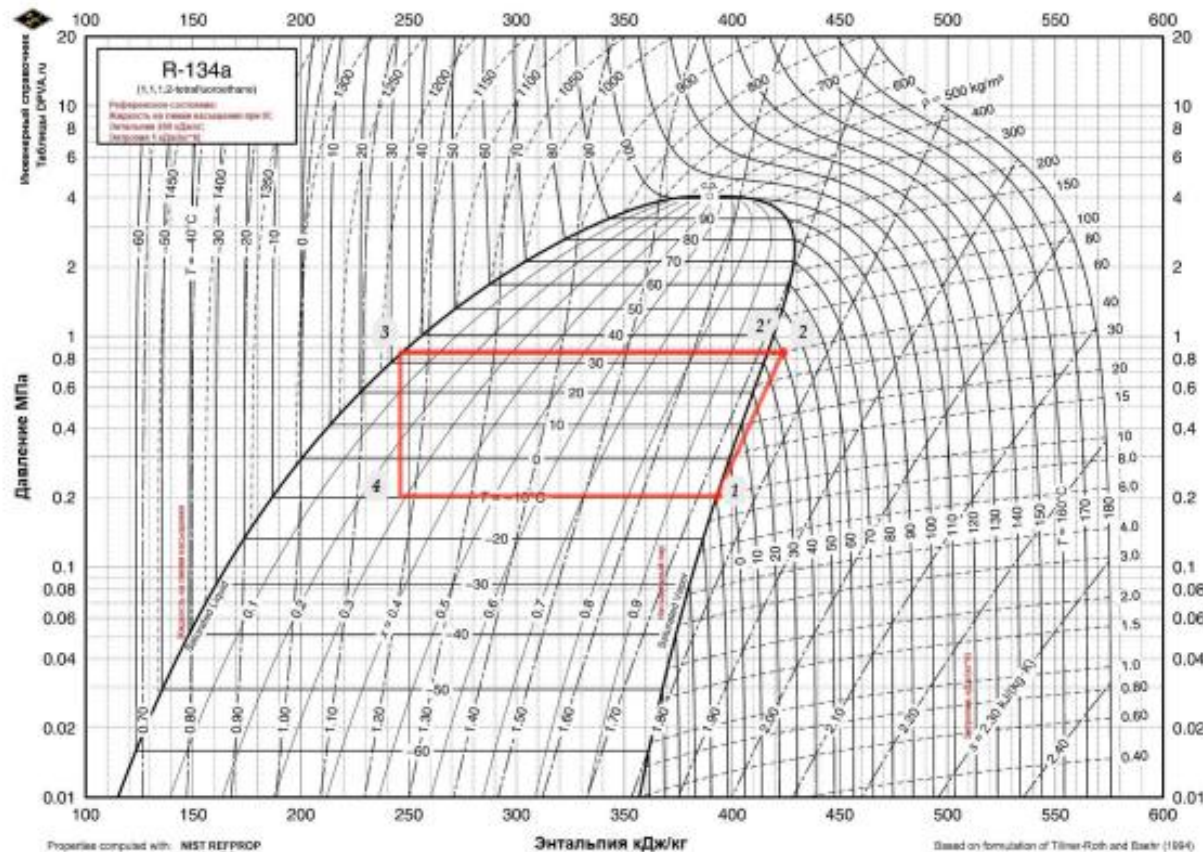
$\Delta w = h_2 - h_1$ механическая работа
сжатия

$\Delta q_{\text{cond}} = h_2 - h_3$ теплота
конденсации

$\Delta q_{\text{vapo}} = h_1 - h_4$ поглощенное тепло
в испарителе

Преимущество p-h диаграммы -
количество тепла, участвующего в
процессах, отображается не
площадями, а прямолинейными
отрезками

Диаграмма Молье для хладагента R134a



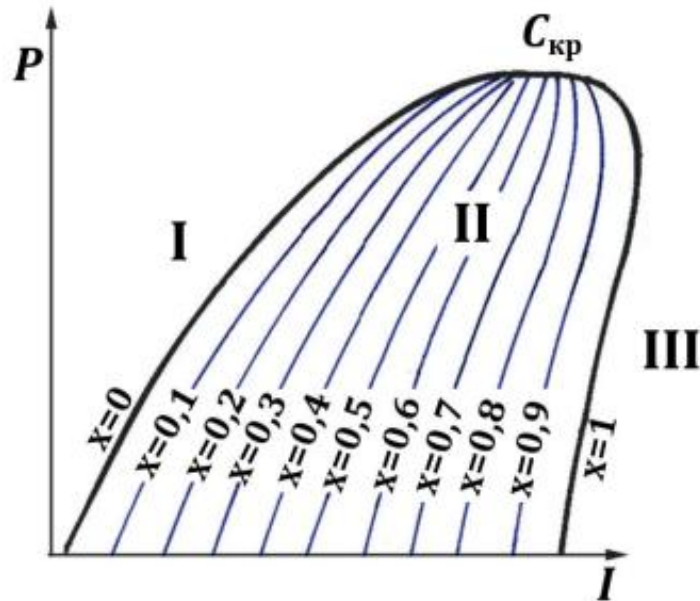
Причины потерь в конденсаторе:

- трение,
- наличие масла в хладагенте,...

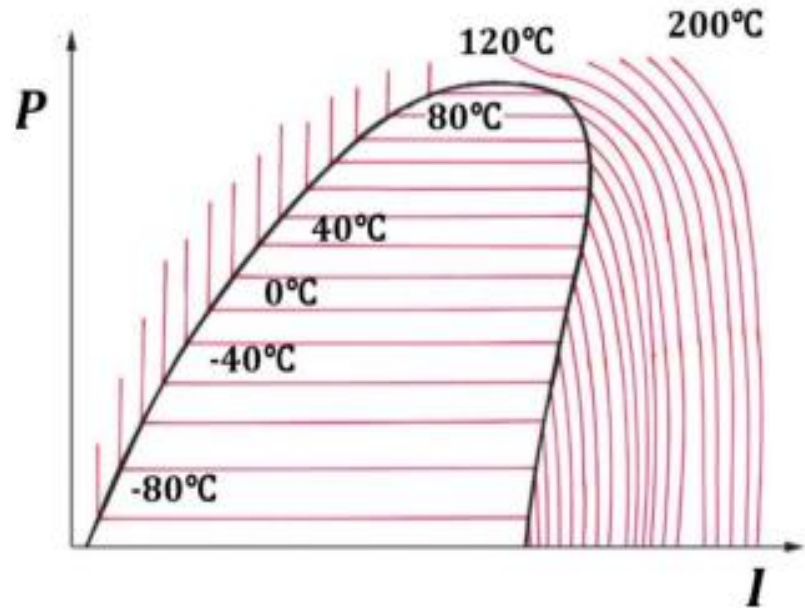
Снижение потерь – за счет уменьшения разности между T конденсации и температурой окружающей среды (участок 1-2)

P - I (h) диаграммы

Область I – хладагент жидкость, II - парожидкость (двухфазное состояние),
III – состояние перегретого пара

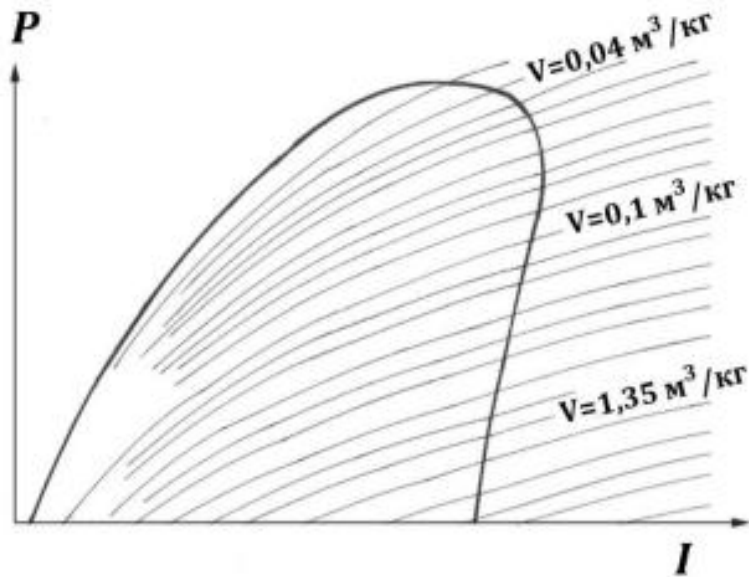


Линии постоянной сухости

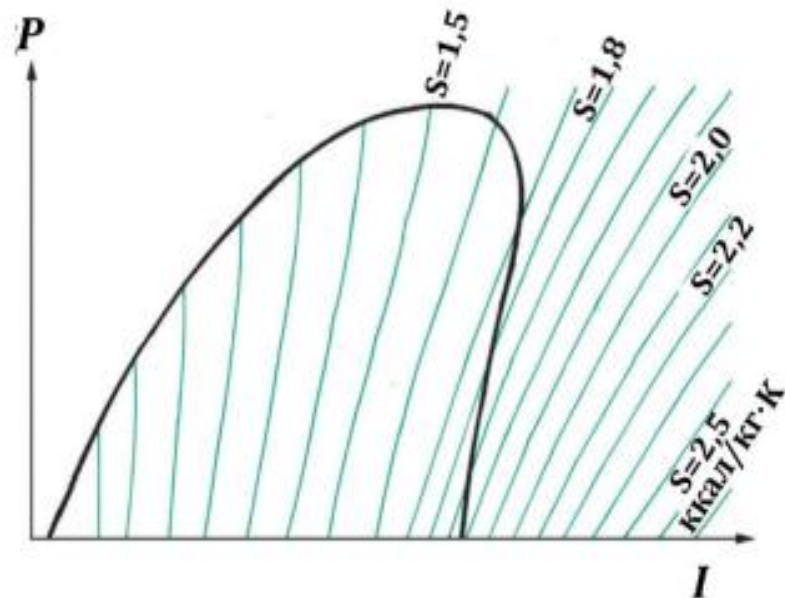


Линии постоянной
температуры - изотермы

P-I диаграммы



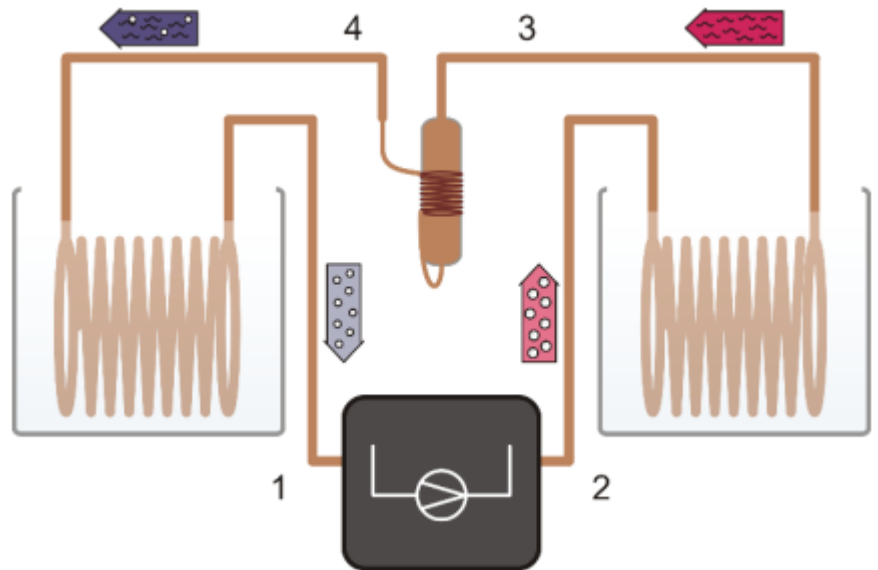
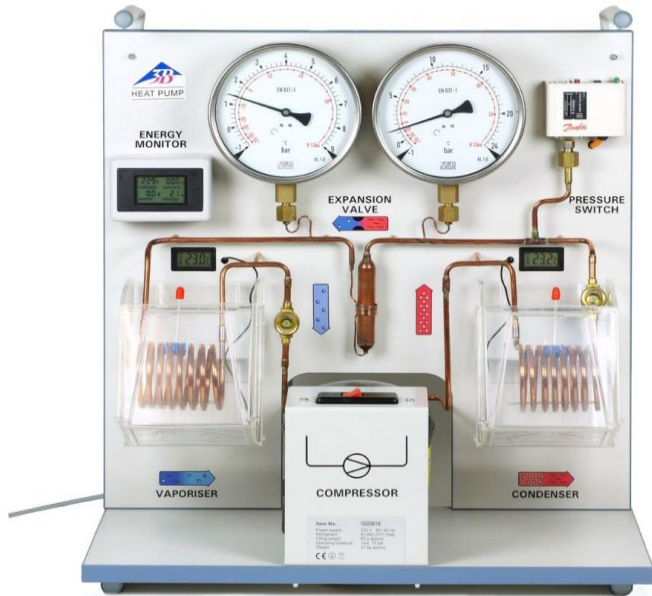
Линии постоянного удельного объема -
изохоры



Линии постоянной энтропии -
изоэнтропы

Лабораторная работа

Постройте температурные кривые для заданного диапазона времени $\Delta t = t_{\text{start}} \div t_{\text{finish}}$. Изобразите на графике $T = f(t)$, как изменяются за заданный промежуток времени температуры T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , T_{vapo} , T_{cond} .



Построение цикла кондиционера на lgP-I диаграмме

1. Задаем: температура кипения $+5^{\circ}\text{C}$ (выше 0),
температура конденсации $+40^{\circ}\text{C}$ (выше окружающей среды на $10\text{-}15^{\circ}\text{C}$).



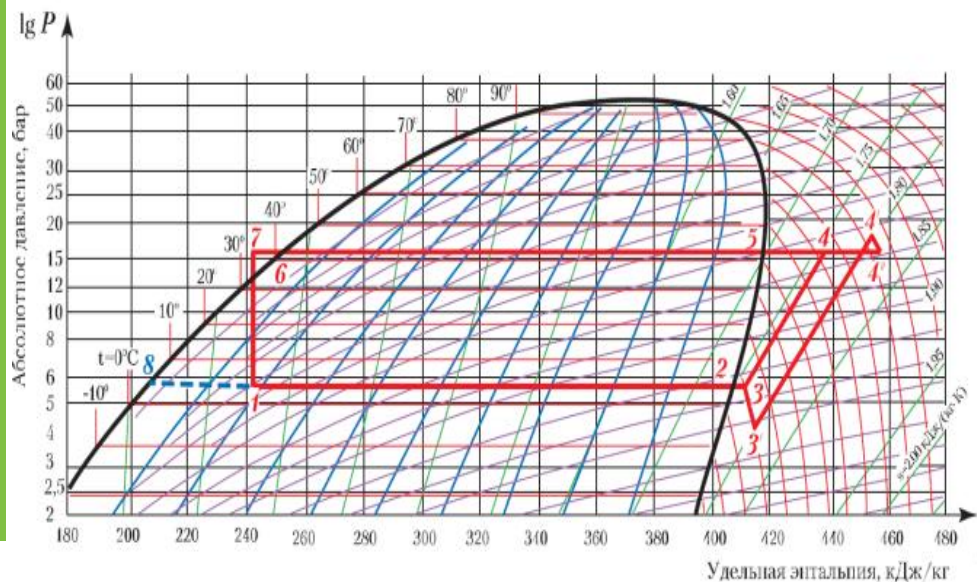
2. Проводим линии постоянного давления
1-2 ($+5^{\circ}\text{C}$) – 5.8 бар
7-5 ($+40^{\circ}\text{C}$) – 15.3 бар.

Построение цикла кондиционера на lgP-I диаграмме

Изотермическое парообразование идет по линии 1-2 и до 3 (+5°C для исключения влажного хода компрессора).

Термодинамические характеристики точки 3:

$P = 5.8$ бар, $t = +10^\circ\text{C}$, $i = 410$ кДж/кг, $S = 1,76$ кДж/кг*К – энтропия (зеленые линии),
 $V = 41$ дм³/кг – удельный объем (лиловые линии).



Изоэнтروпийное сжатие идет по линии 3-4 при $S = 1,76$ кДж/кг*К = const.

Термодинамические характеристики точки 4:

$P = 15.3$ бар, $t = +60^\circ\text{C}$,
 $i = 435$ кДж/кг,
 $V = 17,3$ дм³/кг – удельный объем.

Линия 3' - 4' учитывает потери давления в компрессоре и потери тепла (неидеальная теплоизоляция компрессора)

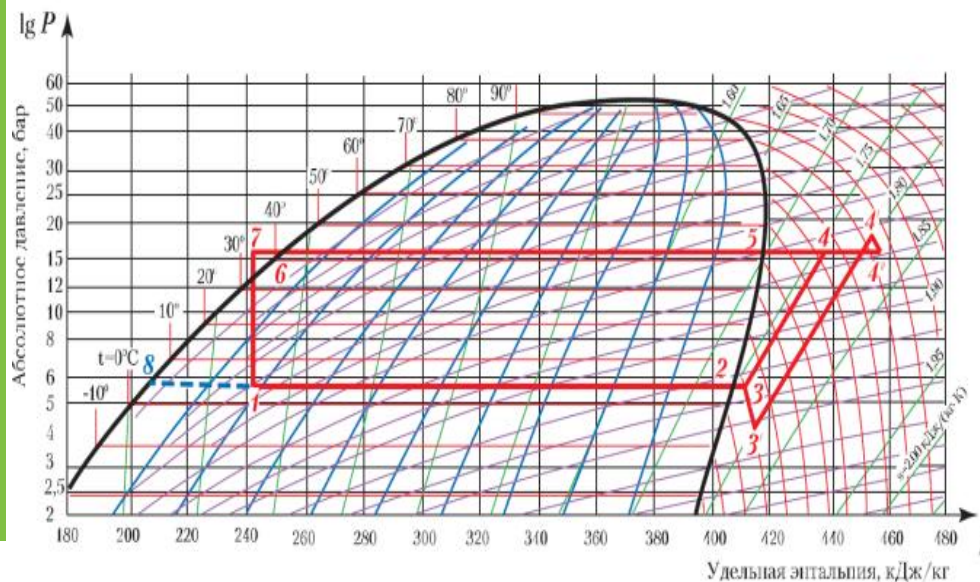
Построение цикла кондиционера на lgP-I диаграмме

Конденсация включает процессы: снятие перегрева (4''-5), конденсации (5-6), переохлаждение хладагента в конденсаторе (6-7).

Термодинамические характеристики точки 7:

$P = 15.4$ бар, $t = +35^\circ\text{C}$, $i = 242$ кДж/кг,

S – энтропия, V – удельный объем в точке 7 для расчетов не нужны.



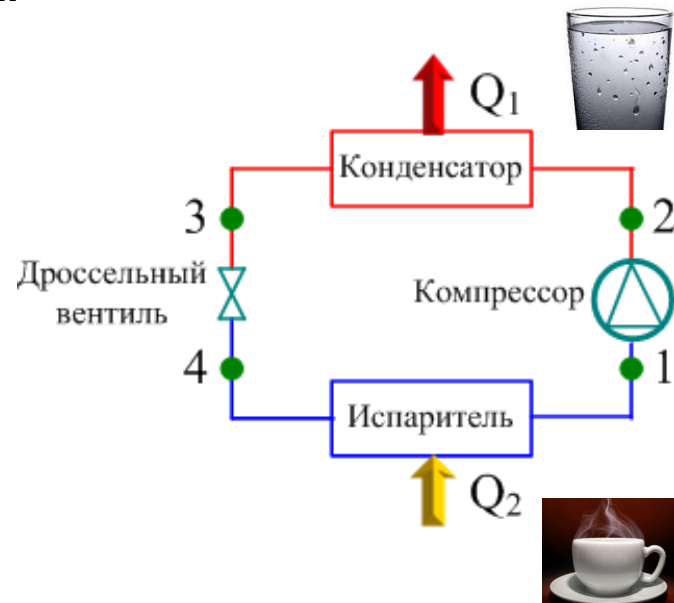
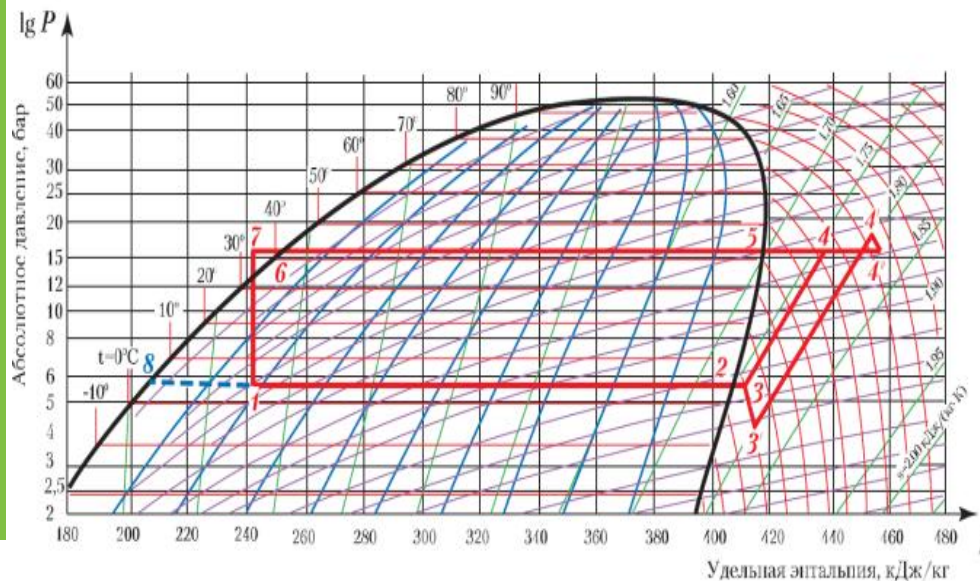
Построение цикла кондиционера на lgP-I диаграмме

Изоэнтальпийное расширение идет по линии 7-1 при $l = 242 \text{ кДж/кг} = \text{const.}$

Термодинамические характеристики точки 1:

$P = 5.84 \text{ бар}$, $t = +5^\circ\text{C}$,

$l = 242 \text{ кДж/кг}$.



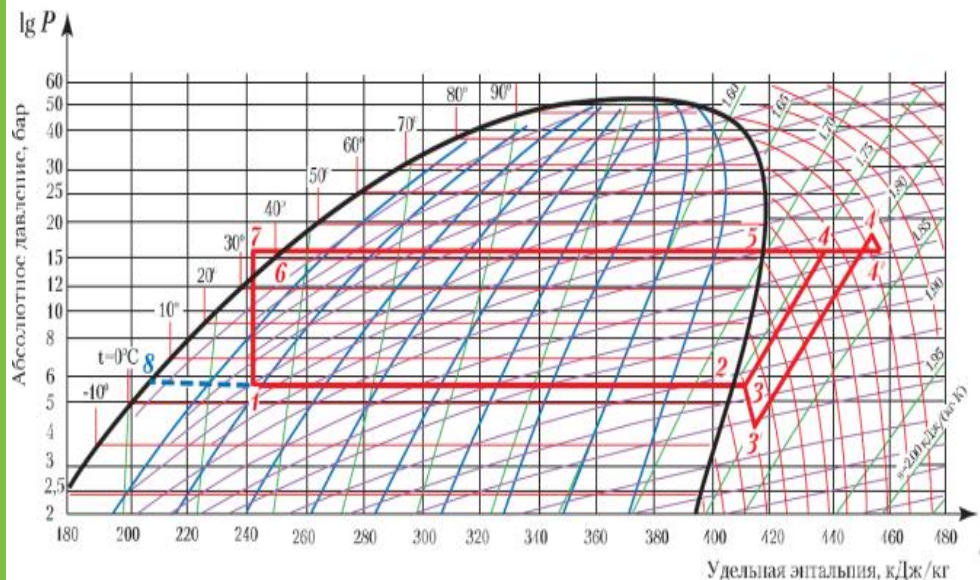
Количественная оценка термодинамических процессов в холодильной машине

Количество тепла для преобразования жидкого хладагента в парообразный

$$I_3 - I_1 = 410 - 242 = 168 \text{ кДж/кг.}$$

Количество энергии для сжатия хладагента из состояния 3 в 4

$$I_4 - I_3 = 435 - 410 = 25 \text{ кДж/кг.}$$



Количество тепла, выделяемое хладагентом в процессе конденсации

$$I_4 - I_7 = 435 - 242 = 193 \text{ кДж/кг.}$$

Холодопроизводительность машины

$$Q_2 = M(I_2 - I_1), \text{ кДж/с.}$$

M – количество хладагента, прошедшее через испаритель за секунду.

Холодильный коэффициент

$$\xi = (I_2 - I_1)/(I_4 - I_3)$$

Рекомендуемая литература



1. Петров, А. И. Техническая термодинамика и теплопередача / А. И. Петров. — 3-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2024. — ISBN 978-5-507-47350-2. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/362333> (дата обращения: 20.08.2024). — Режим доступа: для авториз. пользователей. — С. 125.

