

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Курганский государственный университет»
Кафедра «Энергетика и технология металлов»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХОЛОДИЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА КОМПРЕССИОННОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ

Методические указания
к выполнению лабораторной работы
по дисциплине «Основы трансформации теплоты»
для бакалавров направления
13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Кафедра: «Энергетика и технология металлов».

Дисциплина: «Основы трансформации теплоты».

Направление: 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника».

Составил: канд. техн. наук, доцент В. А. Савельев.

Печатается в соответствии с планом издания, утвержденным методическим советом университета «10» декабря 2020 г.

Утверждены на заседании кафедры «05» апреля 2021 г.

Определение холодильного коэффициента компрессионной холодильной машины

Цель работы: ознакомление с устройством, работой и методикой определения показателей работы компрессионной холодильной машины.

Принцип работы холодильных машин

Устройства, служащие для переноса тепловой энергии от тела с более низкой температурой T_n (теплоотдатчика) к телу с более высокой температурой T_b (теплоприемнику), называются трансформаторами тепла. Осуществление такого преобразования тепла, происходит с затратой внешней энергии: механической, электрической, химической и др. Традиционным направлением трансформаторов теплоты является производство искусственного холода холодильными машинами. Охлаждение как необходимое звено входит во многие технологические процессы разных отраслей промышленности: машиностроения, энергетики, металлургии, медицины, пищевой, сельскохозяйственной и других.

Устройство и работу трансформатора тепла рассмотрим на примере пароконпрессионной холодильной машины. В цикле паровой компрессионной холодильной машины происходит непрерывное фазовое превращение рабочего тела (кипение, испарение, а затем конденсация). Цикл машины представляет собой обратный цикл Карно и происходит в области влажного или перегретого пара.

Осуществим обратимый цикл Карно в обратном направлении. Рабочее тело с начальными параметрами точки a (рисунок 1) расширяется адиабатно, совершая работу расширения за счет внутренней энергии, и охлаждается от температуры T_1 до температуры T_2 . Дальнейшее расширение происходит по изотерме, и рабочее тело отбирает у нижнего источника с температурой T_2 теплоту q_2 . Далее газ подвергается сжатию сначала по адиабате, и его температура от T_2 повышается до T_1 , а затем – по изотерме ($T_1 = \text{const}$). При этом рабочее тело отдает верхнему источнику с температурой T_1 количество теплоты q_1 .

Поскольку в обратном цикле сжатие рабочего тела происходит при более высокой температуре, чем расширение, работа сжатия, совершаемая внешними силами, больше работы расширения на величину площади $abcd$, ограниченной контуром цикла. Эта работа превращается в теплоту и вместе с теплотой q_2 передается верхнему источнику.

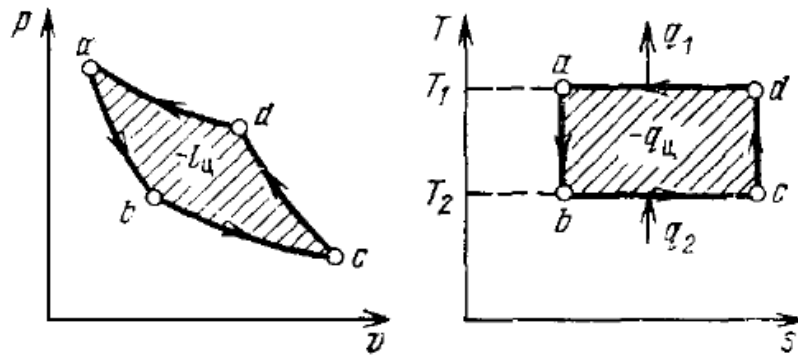


Рисунок 1 – Изображение обратного цикла Карно в p - v - и T - S -координатах

Таким образом, затратив на осуществление обратного цикла работу l_u , можно перенести теплоту от источника с низкой температурой к источнику с более высокой температурой, при этом нижний источник отдаст количество теплоты q_2 , а верхний получит количество теплоты q_1 :

$$q_1 = q_2 + l_u$$

Обратный цикл Карно является идеальным циклом холодильных установок. Схема передачи теплоты от холодного источника к горячему в обратном цикле Карно показана на рисунке 2.

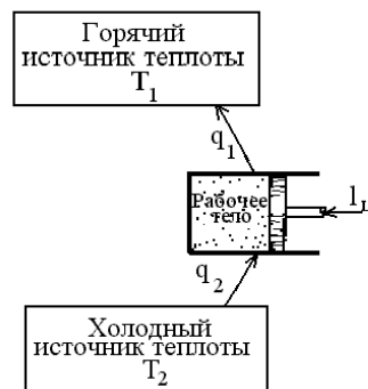


Рисунок 2 – Термодинамическая схема холодильной машины

В холодильной установке рабочими телами служат, как правило, пары легко кипящих жидкостей – фреона, аммиака и т. п. Процесс «перекачки теплоты» от тел, помещенных в холодильную камеру, к окружающей среде происходит за счет затрат электроэнергии. Эффективность холодильной установки оценивается холодильным коэффициентом, определяемым как отношение количе-

ства теплоты, отнятой за цикл от холодильной камеры, к затраченной в цикле работе:

$$\varepsilon = q_2 / l_u = q_2 / (q_1 - q_2).$$

Для обратного цикла Карно:

$$\varepsilon = T_2 / (T_1 - T_2).$$

Необходимо отметить, что чем меньше разность температур между холодильной камерой и окружающей средой, тем меньше нужно затратить энергии для передачи теплоты от холодного тела к горячему и тем выше будет холодильный коэффициент. На основании вышеизложенного Рудольф Клаузиус предложил ещё одну формулировку второго закона термодинамики «*Теплота не может самопроизвольно (без компенсации) переходить от тел с более низкой температурой к телам с более высокой температурой*» [1].

Рабочие тела машин для получения холода

Для получения холода в трансформаторах тепла применяют рабочие вещества, циркулирующие в холодильной машине, называемые хладагентами. В процессе работы эти рабочие тела подвергаются фазовым превращениям. Хладагенты должны иметь достаточно низкую температуру кипения, низкую вязкость, высокую теплопроводность и теплоёмкость, быть химически стойкими, негорючими, взрывобезопасными, коррозионностойкими, безвредными для организма человека.

Холодильные агенты бывают естественные и искусственные. К естественным относятся аммиак (NH_3), воздух, вода (H_2O), диоксид углерода (CO_2) и другие. Искусственные холодильные агенты принято называть Freon – фреон, отечественный аналог этого слова – хладон. Хладоны (фреоны) химически инертны, мало- или невзрывоопасны. Они являются производными предельных углеводородов, получаемых путем замены атомов водорода в насыщенном углеводороде $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ атомами фтора, хлора, брома ($\text{C}_n\text{H}_x\text{Cl}_z\text{F}_y\text{Br}_u$). Число молекул отдельных составляющих, входящих в химические соединения хладонов, связаны зависимостью

$$x + y + z + u = 2n + 2.$$

Международным стандартом принято краткое обозначение всех холодильных агентов, состоящее из символа R (Refrigerant – хладагент) и определяющей цифры. Любой холодильный агент обозначается символами RN, где R – символ, указывающий на вид холодильного агента, N – номер хладона или при-

своенный номер для других холодильных агентов. Например, фреон-12 имеет обозначение R12.

Они могут быть однородными или являться смесью нескольких, обычно двух, веществ. Смесей, составленные из двух хладагентов называются азеотропными. Например, азеотропную смесь, состоящую из 48,8 % R22 по массе и 51,2 % R115(C₂F₅Cl), называют хладон R502, его температура кипения при давлении – 0,1 МПа – 45,6 °С. Хладон R502 можно обозначить R22/R115 (48,8/51,2). Такие смеси кипят и конденсируются при постоянной температуре как однородные вещества [2].

Цифры расшифровываются в зависимости от химической формулы. Вначале указывается цифра, обозначающая: 1 – метановый ряд; 11 – этановый ряд; 21 – пропановый ряд; 31 – бутановый ряд; затем цифра, равная числу фтора. Например: 1 – CH₄, метан; 11 – C₂H₆, этан; 21 – C₃H₈, пропан; 31 – C₄H₁₀, бутан. Справа указывают число атомов фтора в хладоне: CFCl₃ – R11, CF₂Cl₂ – R12, C₃F₄Cl – R113, CCl₄ – R10, C₂F₂Cl₃ – R113. При наличии в хладоне незамещенных атомов водорода их число добавляют к числу десятков номера: CHFCl₂ – R21, CHF₂Cl – R22. Если в состав хладона входят атомы брома, после основного номера пишут букву В, а за ней число атомов брома: CF₂Br₂ – R12B2 [1].

Схема и параметры работы холодильной машины

Работа парокompрессионных холодильных машин основана на сжатии в компрессоре сухого насыщенного или незначительно перегретого пара (хладагента). В цикле паровой компрессионной холодильной машины происходит непрерывное фазовое превращение рабочего тела (кипение, испарение, а затем конденсация). Принципиальная схема одноступенчатой идеальной паровой холодильной машины приведена на рисунке 3.

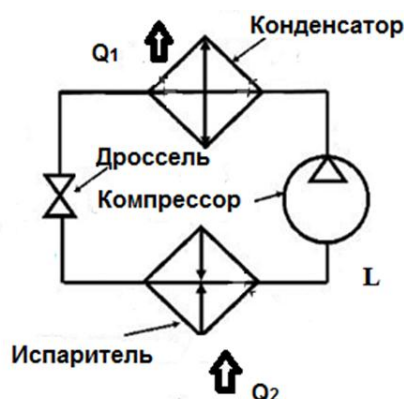


Рисунок 3 – Принципиальная схема парокompрессионной холодильной машины

Основными элементами оборудования установки являются компрессор, конденсатор, регулировочное устройство (дроссель) и испаритель.

Холодильный агент кипит в испарителе при подводе теплоты Q_2 от охлаждаемого тела. Влажный пар из испарителя засасывается компрессором и сжимается адиабатно с повышением давления и температуры. Компрессор совершает работу внешних сил L и нагнетает свежий пар в конденсатор, где пар конденсируется при постоянном давлении с понижением температуры, отдавая охлаждающему теплоносителю тепло Q_1 . Жидкий хладагент поступает в дроссель, где адиабатно расширяется с понижением давления и частично испаряется. Далее хладагент поступает в испаритель, и рабочий цикл повторяется. Цикл паровой компрессионной установки в TS -координатах представлен на рисунке 4 [1].

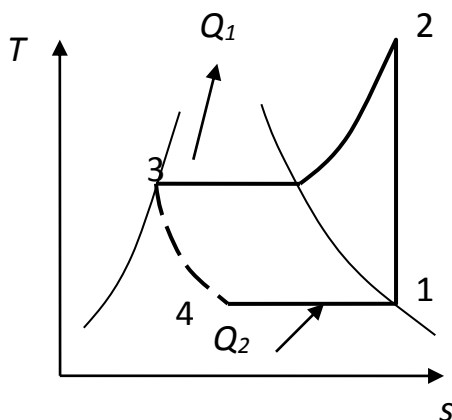


Рисунок 4 – Цикл паровой компрессионной установки в TS -координатах

Процесс сжатия хладагента в компрессоре показан адиабатой 1 – 2. Процесс отвода теплоты Q_1 с понижением температуры показан изобарой 2 – 3. Понижение давления происходит по линии 3 – 4, которую условно считают адиабатой. Процесс испарения в испарителе с подводом теплоты Q_2 показан изобарой 4 – 1, которая одновременно является и изотермой.

Удельную холодопроизводительность установки Q_2 , (кДж/кг) можно определить через разность энтальпий точек 1–4 TS -диаграммы:

$$Q_2 = h_1 - h_4.$$

Затрачиваемая работа (работа привода компрессора) l_u , (кДж/кг) определяется через разность энтальпий точек 1–2:

$$l_u = h_2 - h_1.$$

Расход холодильного агента:

$$m = Q_2/q_2,$$

где Q_2 – холодопроизводительность установки, кДж/с.

Эффективность цикла компрессионной машины оценивается холодильным коэффициентом:

$$\varepsilon = q_2/l_u.$$

Теоретическая мощность, необходимая для привода компрессора:

$$N = m \cdot l_u.$$

Холодильный коэффициент парокомпрессионной установки может быть определён и через разности энтальпий:

$$\varepsilon = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} = \frac{h_1 - h_3}{h_2 - h_1},$$

где h_1 и h_2 – энтальпии на входе и на выходе из компрессора;

h_3 – энтальпия жидкого хладагента после конденсации ($h_3 = h_4$).

Холодильный коэффициент теоретически может быть и выше единицы.

Лабораторная компрессорная установка

Лабораторная установка собрана на базе кулера для охлаждения и нагрева воды. Внешний вид установки показан на рисунке 5.

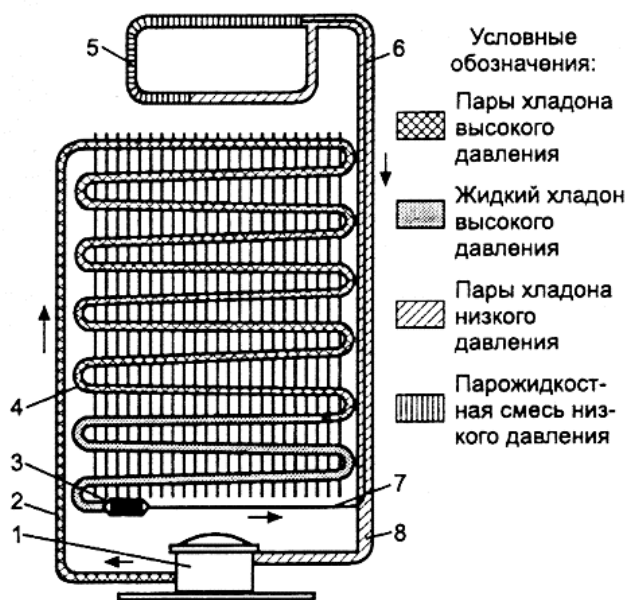


Рисунок 5 – Лабораторная установка для охлаждения жидкости

В корпусе кулера установили счетчик электроэнергии, для наглядности сделали прозрачными стенки холодильной машины, убрали кожух, ёмкости для хранения воды. Испаритель представляет собой сосуд, в который наливается охлаждаемая жидкость. В сосуд помещается термометр для измерения её температуры.

Работа холодильной установки

Конструктивная схема компрессионной холодильной установки показана на рисунке 6. В установку входит компрессор – 1 для сжатия хладагента, конденсатор – 4 для его охлаждения, дроссельное устройство – 3 (расширитель для понижения давления хладагента) и испаритель – 5, в котором осуществляется извлечение теплоты из охлаждаемого тела.



1 – компрессор; 2 – пары хладагента высокого давления; 3 – дроссель; 4 – конденсатор; 5 – испаритель; 6 – пары хладагента низкого давления; 7 – капиллярная трубка; 8 – отсасывающая трубка паров в компрессор

Рисунок 6 – Конструктивная схема компрессионной холодильной машины

Между устройствами рефрижератора (русский аналог – холодильник) циркулирует рабочее тело – фреон (отечественный аналог – хладон). Компрессор сжимает хладагент и под давлением он поступает в конденсатор, где отдает теплоту, полученную при сжатии. В конденсаторе хладон претерпевает фазовое превращение – частично сжижается, затем поступает в дроссель, где расширяется с понижением давления и превращается в пар низкого давления. Пары хладагента низкого давления поступают в испаритель. В испарителе за счет испа-

рения хладагента теплота отводится. Пары хладона низкого давления поступают снова в компрессор.

Методика проведения опытов

Охлаждаемым телом установки является вода, которая наливается в испаритель в объёме одного литра. Перед включением установки проверяется герметичность соединений и измеряется начальная температура воды термометром. При снижении температуры воды на 3 °С холодильник выключается, а показания термометра и ваттметра заносятся в таблицу 1. Затем сбрасываются показания ваттметра и опыты повторяются с понижением температуры воды.

Таблица 1 – Протокол испытаний

№ п/п	Показатель	Ед. изм.	Номер опыта				
			1	2	3	4	5
Измеренные величины							
1	Масса охлаждаемого вещества, вода	кг	1				
2	Показания термометра перед проведением опыта	°С					
3	Показания термометра после проведения опыта	°С					
4	Показание ваттметра	кWh					
5	Время проведения опыта	мин					
Вычисленные показатели							
1	Температурный напор, ΔT	°С					
2	Количество теплоты необходимое для охлаждения, q	Дж					
3	Количество затраченной работы, l	Дж					
4	Холодильный коэффициент, ε	-					

Обработка результатов эксперимента

1 Рассчитываем теплоту, отводимую от охлаждаемой воды по формуле:

$$q = C_p \cdot m \cdot \Delta T,$$

где C_p – удельная изобарная теплоёмкость воды = 4,19 кДж/кг К ;

m – масса охлаждаемого вещества, кг;

ΔT – температурный напор.

2 Температурный напор определим по формуле:

$$\Delta T = (T_1 - T_2),$$

где T_1 – показания термометра перед проведением опыта, °С;

T_2 – показания термометра после проведения опыта, °С.

- 3 Работу l , затраченную на привод компрессора и определенную по счетчику в κWh , переведем по формуле:

$$l = 3,6 \cdot 10^3 \cdot \kappa Wh \text{ (Дж)}.$$

- 4 Холодильный коэффициент \mathcal{E} определим по формуле

$$\mathcal{E} = q/l,$$

где q – отводимая теплота, Дж;

l – работа компрессора.

- 5 Результаты расчетов занести в таблицу.

Отчет о выполненной работе должен включать:

- 1) цель работы;
- 2) принципиальную схему холодильной машины;
- 3) таблицу результатов измерений и расчетов (таблица 1);
- 4) выводы по работе.

Контрольные вопросы

- 1 По какому термодинамическому циклу работают холодильные машины?
- 2 Изобразите обратный цикл Карно в pV - и ts -координатах.
- 3 Какие требования предъявляются к хладагентам холодильных машин?
- 4 Какие устройства входят в состав холодильной машины?
- 5 Опишите работу компрессионной холодильной машины.
- 6 Какие показатели характеризуют работу холодильной машины?
- 7 Как рассчитывается холодильный коэффициент?
- 8 Опишите работу абсорбционной холодильной машины.
- 9 Что такое эжектор?
- 10 Как обозначаются хладагенты?

Библиографический список

1 Луканин П. В. Технологические энергоносители предприятий (Низкотемпературные энергоносители) : учеб. пособие / П. В. Луканин. – Санкт-Петербург : ГОУ ВПО СПбГТУ, 2009. – 116 с.

– URL: https://www.yandex.ru/search/?lr=53&text=tep_lukanin (дата обращения: 23.08.2017).

2 Соколов Е. Я. Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения : учеб. пособие / Е. Я. Соколов, В. М. Бродянский. – 2-е изд., перераб. – Москва : Энергоиздат, 1981. – 320 с.

– URL: [Studmed.ru_sokolov-eya-brodyanskiy-vm-energeticheskie-osnovy-transformacii-tepla-i-processov-ohlazhdeniya_71bf2e37ba6](http://studmed.ru/_sokolov-eya-brodyanskiy-vm-energeticheskie-osnovy-transformacii-tepla-i-processov-ohlazhdeniya_71bf2e37ba6). (дата обращения: 20.10.2018).

Савельев Виктор Андреевич

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХОЛОДИЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА КОМПРЕССИОННОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ

Методические указания
к выполнению самостоятельной работы
по дисциплине «Основы трансформации теплоты»
для бакалавров направления
13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Редактор В. С. Никифорова

Подписано в печать 24.12.21	Формат 60x84 1/16	Бумага 80 г/м ²
Печать цифровая	Усл. печ. л. 0,875	Уч.-изд. л. 0,875
Заказ 122	Тираж 25	

Библиотечно-издательский центр КГУ.
640020, г. Курган, ул. Советская, 63/4.
Курганский государственный университет.