электронный журнал
МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51038.

 # 04, апрель 2016

УДК 621.565.6

Проектирование и создание холодильной системы на основе парокомпрессионного цикла для физических исследований

Заболотный Д.Ю., *студент*
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Холодильная, криогенная техника. Системы кондиционирования и жизнеобеспечения»

Воронов В. А., *аспирант*
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Холодильная, криогенная техника. Системы кондиционирования и жизнеобеспечения»

Кречетова А.В., *студент*
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Медико-технические информационные технологии»

Галаган Д.В., *студент*
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Холодильная, криогенная техника. Системы кондиционирования и жизнеобеспечения»

Научный руководитель: Скуйбин Б.Г., кафедра «Физика», к.ф.м.н., доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
zabdenis1996@student.bmstu.ru

Цикл холодильной установки с механической компрессией пара и его изображение в p-V (давление - удельный объем) диаграмме показаны на рисунках 1-2.

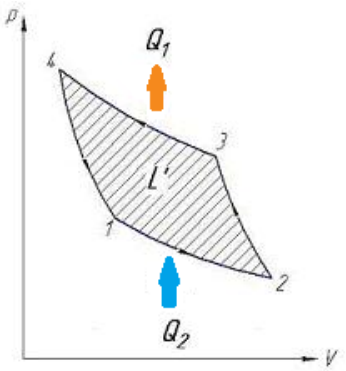

Рис.1 Термодинамический цикл теплового насоса в p-V диаграмме
1-2 – отбор теплоты от низкотемпературного источника, кипение хладагента; 2-3 – процесс сжатия хладагента в компрессоре; 3-4 –охлаждение, конденсация хладагента в конденсаторе; 4-1 – процесс дросселирования жидкого хладагента к начальным условиям.

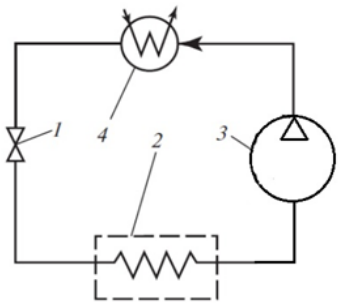

Рис.2 Принципиальная схема парокомпрессионного установки
1-дроссельный вентиль; 2-испаритель; 3-компрессор; 4-конденсатор

Парокомпрессионный цикл холодильной установки (рис.2) состоит из четырех ключевых узлов. Это дроссельный вентиль, испаритель, конденсатор и компрессор.

Рассмотрим цикл начиная с компрессора, поступая в который фреон сжимается, нагревается и под давлением поступает в конденсатор. В конденсаторе нагретый в результате сжатия хладагент остывает, отдавая тепло во внешнюю среду, и при этом конденсируется, то есть превращается в жидкость, где под давлением поступает через дросселирующее устройство (капилляр или терморегулируемый расширительный вентиль) в испаритель, и за счёт резкого уменьшения давления происходит испарение жидкости. При этом хладагент отнимает тепло у внутренних стенок испарителя, за счёт чего происходит охлаждение.

Таким образом, в конденсаторе хладагент под воздействием высокого давления конденсируется и переходит в жидкое состояние, выделяя тепло, а в испарителе под воздействием низкого давления вскипает и переходит в газообразное, поглощая тепло.

Дроссельный вентиль необходим для создания необходимой разности давлений между конденсатором и испарителем, при которой происходит цикл теплопередачи. Он позволяет правильно (наиболее полно) заполнять внутренний объём испарителя вскипевшим хладагентом. Пропускное сечение дроссельного вентиля изменяется по мере снижения тепловой нагрузки на испаритель, при понижении температуры в камере количество циркулирующего хладагента уменьшается [1,2].

Теперь продемонстрируем цикл теплового насоса иным способом, с помощью, широко применяемой на практике для парокомпрессионных циклов диаграммы давление – удельная энтальпия (ln p-h), представленной на рисунке 3.

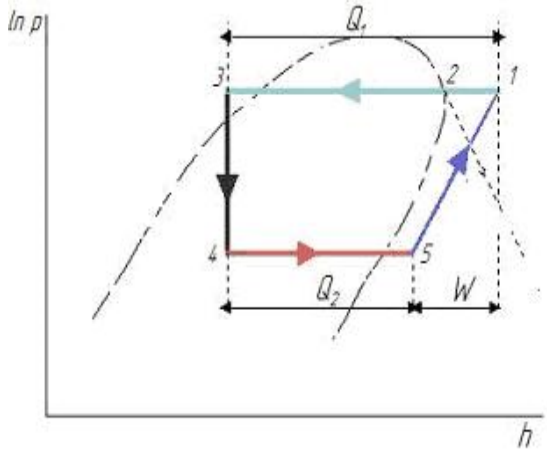

Рис. 3 Термодинамический цикл теплового насоса в ln p-h диаграмме

Сжатое рабочее тело под высоким давлением покидает компрессор в точке 1. Поскольку на вход в компрессор поступал только сухой пар и благодаря наклону линий постоянной энтропии, в точке 1 пар перегрет. Прежде чем пар начнет конденсироваться в точке 2, его следует охладить при постоянном давлении. Между точками 2 и 3 происходит конденсация при постоянной температуре (если нет утечек пара). Адиабатическое расширение изображается в p—h диаграмме вертикальной прямой 3–4, и в этом одна из причин удобства такой диаграммы. Для расчета цикла необходимо знать состояния рабочего тела только на входе в компрессор теплового насоса и выходе из него. Линии 1-3 и 4-5 изображаются прямыми линиями. Кипение происходит при постоянном давлении и температуре между точками 4 и 5. Следует отметить, что смесь содержит значительную долю пара, иногда до 50% по массе, и эта доля рабочего тела, естественно, уже не участвует в процессе испарения и поглощения тепла. Между точками 5 и 1 происходит изоэнтропийное сжатие сухого пара. На практике его реализовать нельзя, но здесь рассмотрен идеализированный цикл. Его эффективность меньше, чем у цикла Карно, из-за необратимости процесса расширения.

Рассмотрим еще одно важное преимущество p—h диаграммы. Поскольку на горизонтальной оси откладывается энтальпия, она допускает прямой отсчет Q_1, Q_2 и W. Поэтому из диаграммы очевидно простое соотношение $Q_1=Q_2+W$. В то же время данная диаграмма позволяет сразу оценить значение холодильного коэффициента COP.

Очевидно, что оно будет тем выше, чем меньше интервал давлений 3-4. Для получения высокого COP значение Q1 должно быть велико, а W (работа сжатия) должна быть мала. Также при взгляде на p—h диаграмму любого из хладагентов можно быстро оценить его пригодность к работе исходя из давлений кипения и конденсации [3].

Таким образом мы видим, что парокомпрессионный цикл позволяет создать замкнутую холодильную установку, которая будет удобна для проведения физических экспериментов.

Эффект Пельтье - термоэлектрическое явление, заключающееся в том, что при пропускании электрического тока I через контакт (спай) двух различных веществ (проводников или полупроводников) на контакте, помимо джоулева тепла, происходит выделение дополнительного тепла Пельтье Q_P (при одном направлении тока) и его поглощение (при обратном направлении).

Причина возникновения явления Пельтье (рис.4) заключается в следующем. На контакте двух веществ имеется контактная разность потенциалов, которая создает внутреннее контактное поле. Если через контакт идет ток, то это поле будет способствовать прохождению тока либо ему препятствовать. Если ток идет против контактного поля, то внешний источник должен затратить дополнительную энергию, которая выделяется в контакте, что приведет к его нагреву. Если же ток идет по направлению контактного поля, то он может поддерживаться этим полем, которое и совершает работу по перемещению зарядов. Необходимая для этого энергия отбирается у вещества, что приводит к охлаждению его в месте контакта [4].

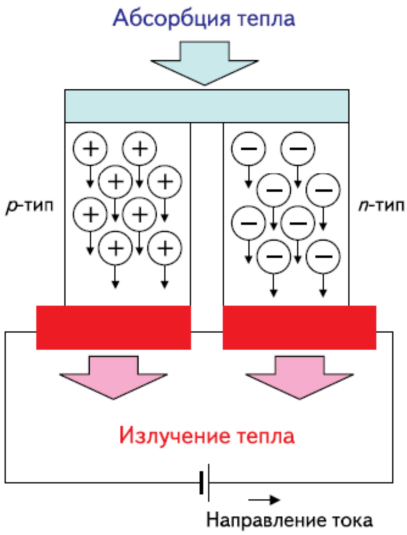

Рис. 4. Иллюстрация эффекта Пельтье

Экспериментальная установка

Устройство установки.

Холодильная установка состоит из:

1. Медного испарителя;
2. Компрессора

3. Конденсатора
4. Вентилятора
5. Фильтра
6. Дроссельный вентиля
7. Электронного блока управления

В качестве компрессора (рис.5) был использован герметичный компрессор фирмы Danfoss (Модель Danfoss NL9F, характеристики: первичный хладагент- R134a; напряжение: 220-240V; холодопроизводительность: 155 Вт) [5].

Конденсационный блок (рис.6) состоит из трубчато-ребристого конденсатора и центробежного вентилятора, который обеспечивает достаточный съем тепла для полной конденсации фреона.

Рис. 5 Компрессор

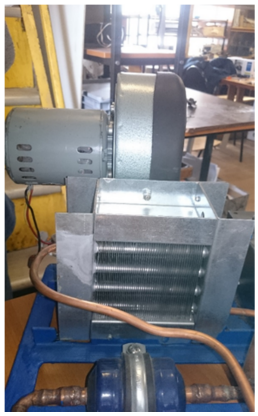

Рис. 6. Конденсационный блок

Одну из важных ролей в установке выполняет ручной дроссельный вентиль (рис.7), с помощью которого происходит процесс резкого расширения, позволяющего работать данном циклу. Стоит отметить, что в более мощных установках обычно используют другие дросселирующие устройства, такие как дроссельные трубки, термо и электрорегулирующие вентили. Но из-за сложностей конструкции и больших затрачиваемых мощностей, мы остановились на данном варианте. Установленный фильтр (рис.8) из-за его относительно большого объема также выполняет роль ресивера.

Электронный блок (рис.9 а,б) управления предназначен для своевременного включения и выключения компрессора и вентилятора. Так же подключен аварийный автомат для непредвиденных скачков напряжения.

Рис. 7. Дроссельный вентиль

Рис.8. Фильтр

Рис.9а. Электронный блок

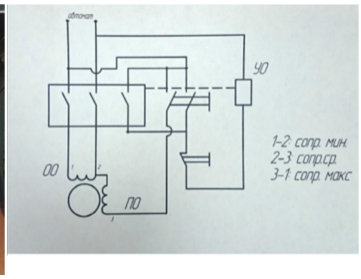

Рис.9б. Схема электронного блока

Испаритель

Испаритель (рис.10) состоит из витых медных трубок и пластины спаянных вместе. В испаритель поступает парожидкостная смесь, где снизу в вверх происходит процесс испарения (рис.11) и далее парообразный фреон поступает в компрессор. Размер, количество и диаметр трубок брался из расчета холодопроизводительности на охлаждающей поверхности должна составлять 100 Вт.

Рис. 10. Испаритель

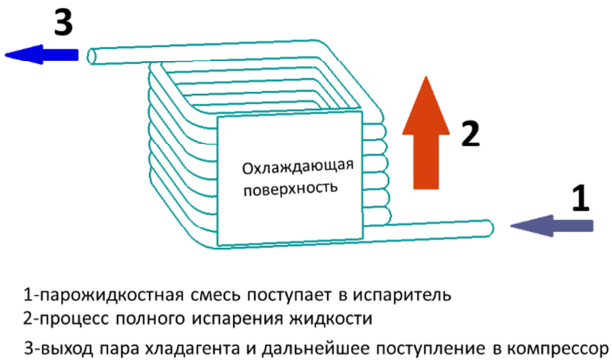

Рис. 11. Схема кипения фреона в испарителе

Расчеты испарителя:

Минимальное количество медных трубок рассчитывается по формуле:

$$N = \frac{a}{d} = \frac{55}{8} = 7.$$

Длина трубки:

$$h = N \cdot a = 55 \cdot 7 = 385 \text{ мм} = 0{,}385 \text{ м}.$$

Площадь поверхности контакта:

$$S = \pi d h = 3{,}14 \cdot 0{,}006 \cdot 0{,}385 = 0{,}0073 \text{м}3.$$

Оценочное значение коэффициента теплоотдачи для кипения фреонов:

$$\alpha = 1500 \ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Тепловая мощность Q=100 Вт задается изначально для расчетов остальных параметров:

$$Q = \alpha \cdot S \cdot \Delta t\,;$$
$$\Delta t = \frac{Q}{\alpha \cdot S} = \frac{100}{1500 \cdot 0{,}0073} = 9{,}13\ К.$$

Мы провели исследования возможностей получения максимально низких температур на испарителе. Оптимизация параметров установки позволяет нам получить следующие результаты

- На рабочем режиме была достигнута температура -35 градусов на охлаждающей пластине.
- Установка позволяет достигать температур в диапазоне от -20 до -35 градусов (без дополнительного регулятора температуры).
- Холодопроизводительность составляет не менее 100 Вт.

Исследование зависимости разницы температур (Δt) на модуле от температуры на его горячей стороне.

Нами проведено исследование зависимости температуры холодной стороны ячейки Пельтье от температуры на ее горячей стороне, управляемой с помощью, созданной нами установки. Исследование проводилось на двух одинаковых модулях Пельтье. Результаты представлены в таблицах 1-2 и проиллюстрированы на рис.12-15.

Исследование связано с проблемой переохлаждения ячеек Пельтье при понижении температуры на горячей стороне ячейки ниже -10°С.

Таблица № 1

Результаты исследования 1

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
t гор.стор	18,23	15,39	13,37	9,47	4,29	2,75	1,02	-3,61	-8,25	-11,49	-14,93	-19,67
Δt	54	54	54	51	50	49	48	45	32	18	15	14

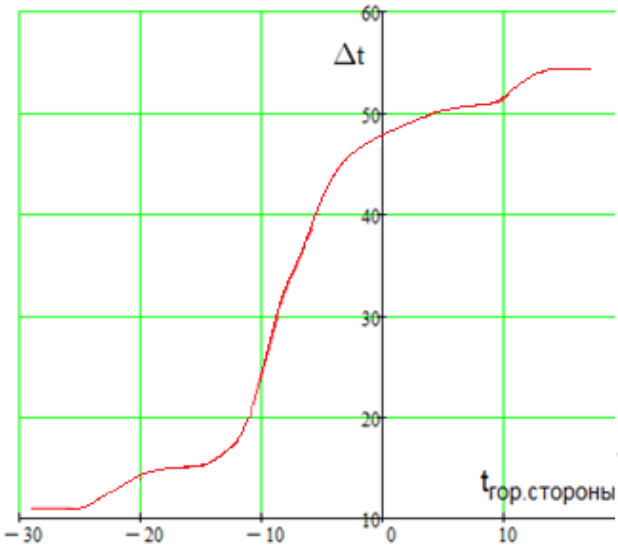

Рис.12 График зависимости Δt от температуры на горячей стороне модуля.

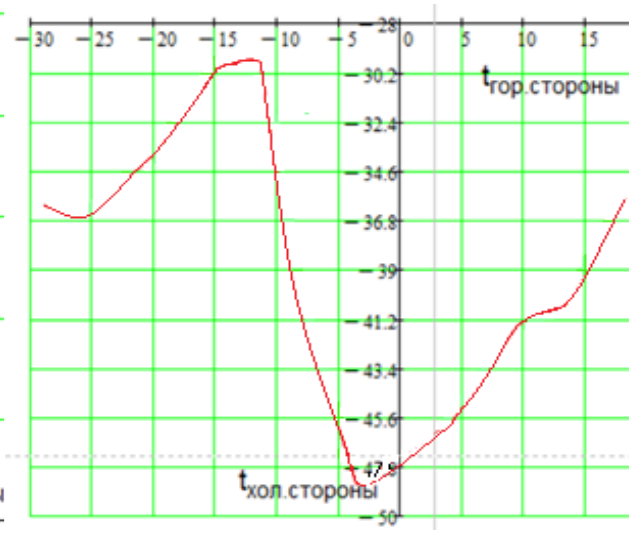

Рис.13 График зависимости температуры на холодной стороне модуля от температуры на горячей стороне модуля.

Таблица № 2

Результаты исследования 2

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
t гор.стор	19,91	17,46	15,67	10,47	4,13	2,19	0,78	-4,61	-9,25	-11,49	-16,93	-20,87
Δt	56	57	55	51	50	51	48	41	34	21	17	12

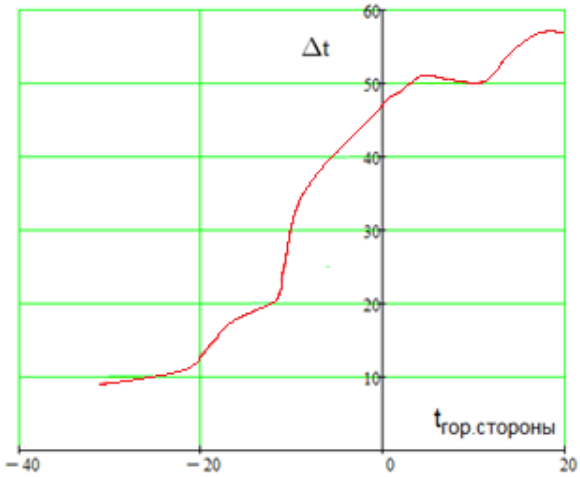

Рис.14. График зависимости Δt от температуры на горячей стороне модуля.

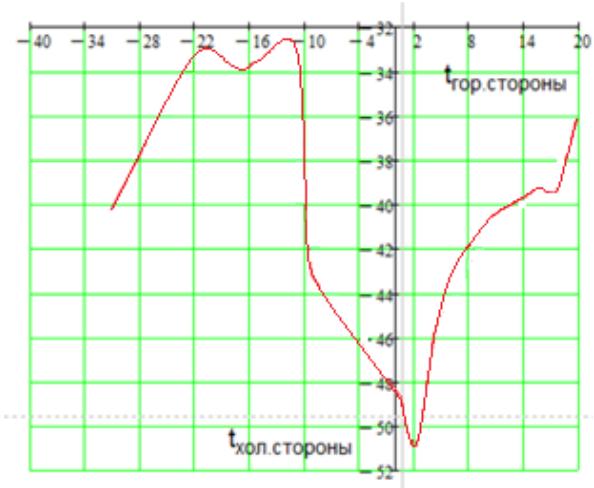

Рис.15. График зависимости температуры на холодной стороне модуля от температуры на горячей стороне модуля.

В ходе эксперимента были проведены замеры температуры на двух ячейках Пельтье и выявлено падение Δt при температуре около -8°С на горячей стороне ячейки, вплоть до Δt=9-10°С.

Выводы

Нами проведено исследование зависимости температуры холодной стороны ячейки Пельтье от температуры на ее горячей стороне, управляемой с помощью, созданной нами установки.

Как видно из полученных нами результатов целесообразно работать с ячейкой Пельтье в диапазоне температур горячей стороны не ниже -5 ^{o}C, т.к. при этой температуре происходит резкое падение разницы температур между сторонами ячейки Пельтье.

Выбор ячейки Пельтье необходимо осуществлять с учетом материала проводников или полупроводников, использующихся в ячейке Пельтье, т.к. от материала зависят температурные параметры, при которых ячейка Пельтье может сохранять стабильную разницу температур между сторонами модуля при существенном охлаждении её горячей стороны.

Список литературы

[1] Бараненко А.В., Бухарин Н.Н., Пекарев В.И., Тимофеевский Л.С. Холодильные машины: учебник для студентов втузов специальности «Техника и физика низких температур» / под общ. ред. Л.С. Тимофеевского. СПб.: Политехника, 1997. 992с.

[2] Рей Д., Макмайкл Д.- Тепловые насосы: Пер. с англ. / М.: Энергоиздат, 1982. 224 с, ил. [D.Reay, D.Macmichael Heat pump. Design and applications. Pergamon Press, Oxford.].

[3] Крутов В.И., Исаев С.И., Кожинов И.А., Козлов Н.П. Техническая термодинамика: учебник для машиностроит. спец. вузов / под общ. ред. Крутов В.И. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1991. 384 с.

[4] Шостаковский П. Современные решения термоэлектрического охлаждения для радиоэлектронной, медицинской, промышленной и бытовой техники // Компоненты и технологии. Электронный журнал. 2009. № 12. Режим доступа: http://kryothermtec.com/assets/dir2attz/a.pdf (дата обращения 16.11.2015).

[5] Danfoss A/S -международный концерн по производству тепловой автоматики. Режим доступа: http://products.danfoss.com (дата обращения 18.11.2015).