

УДК 621.56

И.Н. ЛУКАШЕВ, Г.А. ГОРБЕНКО, П.Г. ГАКАЛ, Р.Ю. ТУРНА, Н.И. ИВАНЕНКО

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## ПАРОКОМПРЕССИОННАЯ ХОЛОДИЛЬНАЯ МАШИНА С СОЛЕНОИДНЫМ КЛАПАНОМ В КАЧЕСТВЕ РЕГУЛЯТОРА РАСХОДА ХЛАДАГЕНТА

*Анализируется переход от традиционной холодильной машины с терморегулирующим вентилем (ТРВ) к холодильной машине с соленоидным клапаном. Показано, что замена ТРВ на соленоидный клапан позволит снизить энергопотребление, количество заправляемого в систему хладагента, а также позволит отказаться от некоторых элементов, которые используются в традиционных холодильных машинах (жидкостного ресивера, нагревателей (тэнов) подсистемы оттайки и др.), что существенно удешевит холодильную машину, повысит её надёжность, энергоэффективность, экологическую безопасность.*

**Ключевые слова:** *холодильная машина, терморегулирующий вентиль, соленоидный клапан, энергозатраты, экологическая безопасность.*

### Введение

Одним из направлений повышения надежности, безопасности и эффективности холодильных машин (ХМ) является внедрение новых элементов и схемных решений, позволяющих устранить недостатки существующих холодильных машин. На сегодняшний день, наиболее существенными недостатками холодильных машин, особенно промышленных, являются: большой объем заправки хладагента, неэффективная с точки зрения энергозатрат работа ХМ при низких температурах окружающей среды, высокий перегрев хладагента на выходе из испарителя.

Поэтому разработка новых технических решений, направленных на устранение указанных выше недостатков, а также повышение безопасности, в том числе и экологической, надёжности и эффективности ХМ, используемых на промышленных предприятиях и складах, является актуальной задачей.

В статье предложено и обосновано одно из возможных схемных решений ХМ, направленное на устранение перечисленных выше недостатков. Решение базируется на использовании соленоидного клапана в качестве регулятора расхода хладагента.

### 1. Постановка задачи

Основная задача холодильной машины – перенос теплоты от потребителя к окружающей среде с температурой выше, чем температура потребителя. Несмотря на широкую область применения, различную холодопроизводительность, разный темпера-

турный диапазон работы, любая из существующих ХМ имеет фиксированный набор типовых элементов - охладитель (испаритель), конденсатор, компрессор, регулятор расхода хладагента, ресивер, дроссель и т. д. Каждый из перечисленных элементов выполняет определенную функцию. Так, назначение регулятора расхода (они же дросселирующие устройства) – поддержание баланса между количеством испарившегося в охладителе (испарителе) хладагента и расходом хладагента на входе в испаритель. При этом в регуляторе расхода давление хладагента снижается от давления конденсации до давления испарения.

Регуляторы расхода подразделяются на две большие группы, одна из которых предназначена для оснащения ХМ, работающих с перегревом пара за испарителем, в этом случае регулятор поддерживает заданный перегрев пара за испарителем, а другая группа это регуляторы, предназначенные для ХМ с затопленными испарителями. В последнем случае регулятор поддерживает заданный уровень хладагента в испарителе [1].

В зависимости от назначения регуляторы расхода могут иметь разное конструктивное исполнение. Как правило, для холодильных машин с малой холодопроизводительностью, работающих при стабильном давлении конденсации и испарения, в качестве дроссельного устройства используются капиллярные трубки. Достоинство капиллярных трубок в том, что они могут работать как с однофазным, так и с двухфазным хладагентом на входе. Поэтому, в таких холодильных машинах ресивер хладагента отсутствует, хладагент находится в основном в испарителе и конденсаторе, что позволяет существен-

но снизить объем заправки системы. Это положительное свойство безресиверных ХМ позволяет снизить не только их стоимость, но и повысить их безопасность для человека и окружающей среды, т.к. некоторые хладагенты являются озоноразрушающими (некоторые из фреонов), токсичными и пожаровзрывоопасными (пропан, бутан, аммиак), имеют не нулевой потенциал глобального потепления HGPW. Однако существенным недостатком капиллярной трубки является ее узкая область работоспособности, поэтому они могут работать в ограниченном диапазоне холодопроизводительности и температуры окружающей среды.

В промышленных ХМ, в силу универсальности их использования, холодопроизводительность, давление конденсации и испарения изменяются в очень широких диапазонах. Поэтому диапазон работоспособности дросселирующих устройств также должен быть очень широкий. В таких холодильных машинах в качестве регулятора расхода используются терморегулирующие или электронные расширительные вентили (ТРВ, ЭРВ). Использование ТРВ и ЭРВ позволяет существенно расширить диапазон работоспособности ХМ, однако накладывают на ХМ необходимость установки после конденсатора жидкостного ресивера, так как ТРВ и ЭРВ работают только при однофазном (жидком) потоке хладагента на входе.

Типичная схема холодильной машины с ТРВ представлена на рис. 1. В систему входят: компрессор (К), испаритель (И), конденсатор (КН), терморегулирующий вентиль (ТРВ), фильтр-осушитель (Ф), ресивер (Р), соленоидальный клапан (СВ), смотровое окно (СО), термобаллон (Б).

В компрессоре (К) перегретый пар сжимается до давления конденсации. Температура перегретого пара больше температуры окружающей среды. Перегретый пар поступает в конденсатор (КН), где он охлаждается и конденсируется. Затем конденсат поступает в ресивер (Р), в котором происходит сепарация двухфазной среды. Жидкая фаза через фильтр-осушитель (Ф), смотровое окно (СО), соленоидальный клапан (СВ) поступает в ТРВ, где ее давление снижается до давления испарения и она поступает в испаритель (И). Расход хладагента регулируется путем изменения площади проходного сечения ТРВ в зависимости от перегрева пара на выходе из испарителя. Перегрев фиксируется с помощью термобаллона (Б).

Давление, и соответственно температура, конденсации зависит от температуры окружающей среды и изменяется в течение суток и времени года. Увеличение температуры окружающей среды приводит к увеличению температуры конденсации, а увеличение температуры конденсации на 1°C при-

водит к снижению холодопроизводительности на 1-2%, и возрастанию удельного расхода электроэнергии на 2-2,5% [2]. При снижении давления конденсации холодопроизводительность возрастает, энергопотребление уменьшается. Но при этом следует учитывать ограничение ТРВ по минимальному давлению конденсации.

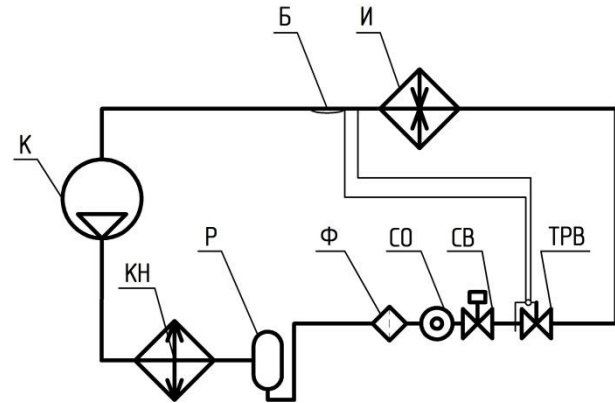


Рис. 1. Схема стандартной паровой компрессионной ХМ: К – компрессор; КН – конденсатор; Ф – фильтр-осушитель; СО – смотровое окно; СВ – соленоидальный клапан; Р – ресивер; И – испаритель; Б – термобаллон; ТРВ – терморегулирующий вентиль

В зимний период времени температура окружающей среды иногда становится ниже температуры в холодильной камере (потребителе холода). Как следствие появляется возможность прямого охлаждения камеры без реализации холодильного цикла (т.н. режим «фрикулинга (free cooling)»). Однако техническая реализация режима «фрикулинга» обычно сопряжена с большими техническими трудностями и не оправдывается экономически. Поэтому режим фрикулинга реализуют, как правило, на достаточно крупных холодильных установках, при достаточно большом количестве часов в году с температурой окружающей среды ниже температуры потребителя. Чаще всего и в зимний период теплота от потребителя отводится холодильной машиной. Но при этом необходимо учитывать то, что при снижении давления конденсации и фиксированном давлении в испарителе перепад давления на ТРВ будет уменьшаться. В результате ТРВ будет открываться до достижения максимального открытия. Затем, после полного открытия ТРВ давление испарения начнет также уменьшаться, в соответствии с понижением давления конденсации. Низкое давление испарения может привести не только к остановке всей ХМ, но и к перегреву и выходу со строя компрессора.

Для сохранения работоспособности ХМ давление конденсации фиксируется и не опускается ниже определенного значения или с помощью от-

дельного регулятора давления конденсации, который поддерживает минимально необходимый для работы ТРВ перепад давлений между конденсатором и испарителем, или путем регулирования условий теплообмена между хладагентом в конденсаторе и окружающей средой, и то и другое приводит к неоправданным энергозатратам.

Таким образом, применение в холодильной машине в качестве регулятора расхода ТРВ наряду с достоинствами имеет и недостатки, обусловленные тем, что:

1) в системе должен быть установлен ресивер, что усложняет конструкцию, увеличивает массу заправляемого хладагента и, в конечном итоге, приводит к росту стоимости ХМ, снижает ее экологическую безопасность;

2) в зимний период необходимо фиксировать давление конденсации на минимально допустимом уровне, что приводит к неоправданно высокому потреблению электроэнергии компрессором, что ухудшает энергоэффективность ХМ в целом;

3) в холодильной машине с ТРВ перегрев после испарителя поддерживается на уровне 8-12°C – это связано с инерционностью ТРВ. Такой высокий перегрев приводит к уменьшению эффективности испарителя на 5-10%.

## 2. Холодильная машина с соленоидным клапаном

Одним из способов решения перечисленных выше проблем является использование вместо ТРВ соленоидного клапана в качестве регулятора расхода. Преимущество соленоидного клапана по сравнению с ТРВ в том, что он может пропускать требуемый расход хладагента при минимальном перепаде давлений. Кроме того, он также малочувствителен к появлению двухфазного парожидкостного потока на входе. За счет этого может быть осуществлен очень экономичный цикл холодильной машины в зимнее время с минимальной разностью температур конденсации и испарения, а также отпадает необходимость в использовании ресивера. В силу этого, количество заправляемого хладагента в системе может быть снижено на 60%. Принципиальная схема холодильной машины с соленоидным клапаном представлена на рис. 2.

В представленной схеме парокомпрессионной ХМ используется стандартный соленоидный клапан. Регулирование необходимого расхода хладагента в испаритель осуществляется путём периодического включения/выключения соленоидного клапана (СВ1). Время, когда он находится в открытом/

закрытом состоянии, регулируется контроллером (КНТ), который определяет это время согласно заданной величине перегрева пара на выходе из испарителя (И). Перегрев хладагента контролируется по показаниям датчика температуры (ДТ) и датчика давления (ДД), установленных за испарителем (И). Таким образом, осуществляется подача хладагента в испаритель (И) ровно в том количестве, которое необходимо для отвода требуемого количества теплоты от охлаждаемого объёма или теплоносителя при поддержании перегрева на уровне 3-4 °С. Такая система контроля позволяет повысить заполняемость испарителя (И) хладагентом и его эффективность по сравнению с использованием ТРВ, в котором перегрев обычно поддерживается на уровне 8-12°C.

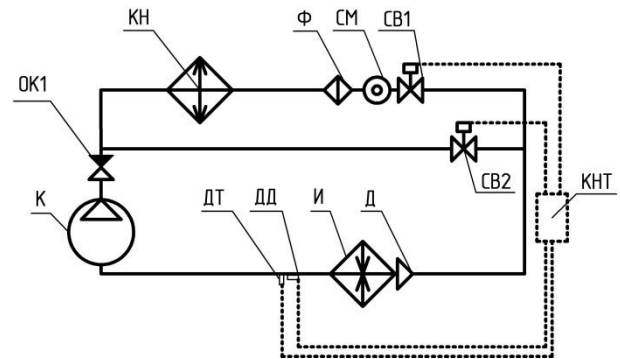


Рис. 2. Схема усовершенствованной парокомпрессионной холодильной машины (УПХМ): К – компрессор; КН – конденсатор; Ф – фильтр-осушитель; СМ – смотровое окно; СВ1, СВ2 – соленоидный клапан; ДД – датчик давления, ДТ – датчик температуры, Д – дистрибьютор; КНТ – контроллер; И – испаритель; ОК1 – обратный клапан

Диаметр трубопровода между конденсатором и испаритель необходимо уменьшить, так как на этом участке будет происходить снижение давления от давления конденсации к давлению испарения.

Кроме того, из-за точного поддержания небольшого перегрева пара за испарителем и при умеренных диаметрах трубопроводов снижается опасность залегания масла в испарителе, отпадает необходимость в установке маслоотделителя и отделителя жидкости после испарителя.

Другим очень важным достоинством системы с соленоидным клапаном является возможность паровой оттайки испарителя за счет подачи на его вход в определенные периоды времени горячих паров хладагента. В этом случае клапан СВ1 закрывается, а клапан СВ2 открывается (см. рис. 2). Горячие пары хладагента с выхода компрессора (К) поступают непосредственно на вход в испаритель (И).

Таблица 1

Основные компоненты ХМ и УПХМ

	Ресивер	Отделитель жидкости	Маслоотделитель	ТРВ или соленоидный клапан	Контроллер	Компрессор	ТЭНы оттаиваки	Конденсатор	Испаритель
ХМ	+	+-	+	+-	+-	+	+	+	+
УПХМ	-	-	-	-	+	+	-	+	+

В большинстве малых и средних ХМ с ТРВ практикуется электрооттайка испарителей специальными нагревателями, так называемыми ТЭНами, что существенно более энергозатратно.

Сравнение элементного состава стандартной холодильной машины с ТРВ или ЭРВ с УПХМ представлено в табл. 1.

Таким образом, в силу сказанного выше, наряду с остальными, наиболее существенным преимуществом ХМ с соленоидным клапаном является уменьшение энергопотребления в зимний период времени, когда температура окружающей среды понижается.

На рис. 3 в качестве примера показано сравнение энергопотребления ХМ и ХМ с соленоидным клапаном в качестве регулятора расхода при разных температурах окружающей среды. В обеих машинах используется один и тот же компрессор 4PCS-15.2Y, работающий на фреоне R507, холодопроизводительность, при температуре испарения  $-21^{\circ}\text{C}$  и температуре конденсации  $35^{\circ}\text{C}$ , составляет 18,7 кВт.

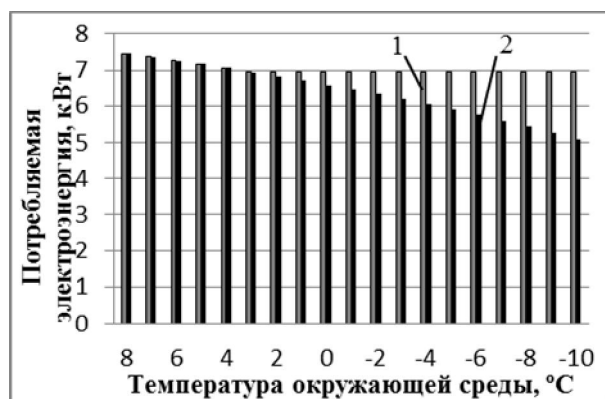


Рис. 3. Энергопотребление ХМ и УПХМ при различных температурах окружающей среды: 1 – ХМ, 2 – УПХМ

При анализе использовались допущения:

- 1) температура конденсации принята на  $15^{\circ}\text{C}$  выше температуры окружающей среды;
- 2) температура испарения фиксирована на уровне  $-21^{\circ}\text{C}$ .

Как следует из результатов, представленных на рис. 3, в зимний период времени, при температуре окружающей среды ниже  $3^{\circ}\text{C}$  ХМ с соленоидным клапаном оказывается энергоэффективнее стандарт-

ной промышленной ХМ. Более низкое энергопотребление по сравнению со стандартной ХМ обусловлено тем, что в стандартной ХМ температура конденсации фиксировалась на уровне  $18^{\circ}\text{C}$ . Это достигалось путем ухудшения условий теплообмена в конденсаторе.

Как следует из графика на рис. 3, даже на такой малой промышленной ХМ при температуре минус  $10^{\circ}\text{C}$  экономия электроэнергии может достигать 1,5-2 кВт, что приведет к снижению годовых эксплуатационных затрат на 4-10%, в зависимости от температуры окружающей среды. При этом также необходимо учитывать, что уменьшаются не только эксплуатационные, но и капитальные затраты.

## Заключение

В работе была рассмотрена пароконденционная ХМ, в которой отсутствует стандартный механический или электронный РВ, ресивер на жидкостной магистрали, маслоотделитель, отделитель жидкости и ТЭНы оттаивания. Было обосновано, что замена ТРВ на простой соленоидный клапан позволит снизить температуру конденсации в зимний период времени. Из-за снижения температуры конденсации будет уменьшено энергопотребление компрессора в осенне-зимний период. Ввиду относительного постоянства полного температурного перепада на конденсаторе нет необходимости в установке ресивера на жидкостной магистрали, что позволяет снизить массу заправляемого хладагента на 60% по сравнению со стандартными холодильными машинами. Так как уменьшается диаметр трубопровода - снижается количество залегающего хладагента в системе - нет необходимости в установке маслоотделителя после компрессора. Точное регулирование перегрева паров хладагента позволяет отказаться от установки отделителя жидкости. Также важной особенностью данной установки является возможность оттаивания воздухоохладителя горячими парами хладагента, что позволяет отказаться от стандартных ТЭНов оттаивания. Всей холодильной машиной может управлять один микроконтроллер.

Таким образом, рассмотренные усовершенствования позволяют снизить энергопотребление ХМ и капитальные затраты. Но для внедрения предла-

гаемых усовершенствований существует ряд проблем, для решения которых требуется разработка адекватных системных моделей, позволяющих проанализировать работу усовершенствованной паровой компрессионной ХМ в зависимости от объема заправляемого хладагента, годового колебания параметров окружающей среды, характеристик основных компонентов. Разработка таких моделей позволит выработать рекомендации к проектированию таких систем.

## Литература

1. Мааке, В. Учебник по холодильной технике [Текст] / В. Мааке, Г.-Ю. Эккерт, Ж.-Л. Кошпен. – М.: «Типография «Новости», 1998. – 1144 с.
2. Котзаогланиан, П. Пособие для ремонтника. Практическое руководство по ремонту холодильных установок с конденсаторами воздушного охлаждения [Текст]: пер. с франц. / П. Котзаогланиан. – М.: ЗАО «Остров», 2000. – 340 с.

*Поступила в редакцию 04.03.2013, рассмотрена на редколлегии 13.03.2013*

**Рецензент:** д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры аэрокосмической теплотехники А.О. Костиков, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

### ПАРОКОМПРЕСОРНА ХОЛОДИЛЬНА МАШИНА З СОЛЕНОЇДНИМ КЛАПАНОМ У ЯКОСТІ РЕГУЛЯТОРА ВИТРАТИ ХОЛОДОАГЕНТА

*І.М. Лукашов, Г.О. Горбенко, П.Г. Гакал, Р.Ю. Турна, Н.І. Іваненко*

Проаналізовано перехід від традиційної холодильної машини з терморегулюючим вентилям (ТРВ) до холодильної машини з соленоїдним клапаном. Показано, що заміна ТРВ на соленоїдний клапан дозволить знизити енергоспоживання, кількість заправляемого в систему хладагенту, а також дозволить відмовитись від деяких елементів, які використані в традиційній холодильній машині (рідинних ресиверів, нагрівачів, (тенів), підсистеми відтаювання та інше), що суттєво здешевить холодильну машину, підвищить її надійність, енергоефективність, екологічну безпеку.

**Ключові слова:** холодильна машина, терморегулюючий вентиль, соленоїдний клапан, енерговитрати, екологічна безпека.

### VAPOR COMPRESSION REFRIGERATION MACHINE WITH A SOLENOID VALVE AS A REGULATOR OF THE REFRIGERANT FLOW

*I.M. Lukashov, G.A. Gorbenko, P.G. Gakal, R.Y. Turna, N.I. Ivanenko*

In this work the transition from conventional freezing machine with thermostatic expansion valve (EEV) to refrigeration machine with a solenoid valve is analyzed. It is shown that replacing of the thermostatic expansion valve to the solenoid valve will reduce the power consumption, the amount of refrigerant fill, and will eliminate some of the elements used in conventional refrigeration machines (liquid receiver, subsystem de-superheaters (heaters), etc.), which significantly reduce the cost of refrigeration machine, increase its reliability, energy efficiency, environmental safety.

**Key words:** refrigeration machine, thermostatic expansion valve, solenoid operated valve, energy demands, environmental safety.

**Лукашев Иван Николаевич** – аспирант кафедры аэрокосмической теплотехники, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: ctrph.kharkiv@gmail.com.

**Горбенко Геннадий Александрович** – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры аэрокосмической теплотехники, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: ctrph.kharkiv@gmail.com.

**Гакал Павел Григорьевич** – д-р техн. наук, доцент, доцент кафедры аэрокосмической теплотехники, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: ctrph.kharkiv@gmail.com.

**Турна Рустем Юсуфович** – научный сотрудник кафедры аэрокосмической теплотехники, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: ctrph.kharkiv@gmail.com.

**Іваненко Ніна Івановна** – старший научный сотрудник кафедры аэрокосмической теплотехники, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: ctrph.kharkiv@gmail.com.