

УДК 621.574.7

Компьютерное исследование эксергетического коэффициента полезного действия контура теплового насоса с аппроксимацией термодинамических свойств фреона R407C

Р.Ш. Ганеев, Э.Н. Самигуллина, Р.Ф. Маннанова

Ганеев Роман Шамилович — аспирант кафедры авиационной теплотехники и теплоэнергетики Уфимского государственного авиационного технического университета, e-mail: ganeevroman@rambler.ru

Самигуллина Эльвина Нилевна — студент кафедры авиационной теплотехники и теплоэнергетики Уфимского государственного авиационного технического университета, e-mail: elwinasamigullina@yandex.ru

Маннанова Регина Фаритовна — студент кафедры авиационной теплотехники и теплоэнергетики Уфимского государственного авиационного технического университета, e-mail: reginamannanova@mail.ru

Разработка математической модели теплового насоса и программы с полной автоматизацией расчетов необходима для определения оптимальных параметров работы теплонасосных установок (ТНУ). Верный подбор эксплуатационных параметров снижает капитальные и эксплуатационные затраты на ТНУ.

Полная автоматизация расчетов невозможна без разработки методики автоматического определения параметров рабочего тела в любой точке рабочего процесса теплового насоса (ТН). В статье описана методика получения полиномиальных зависимостей для аппроксимации термодинамических свойств фреона R407C, сравнены методы автоматического программного определения свойств рабочего тела поиском из таблиц и полиномиальных зависимостей.

Разработана полностью автоматизированная программа для расчета параметров ТН на фреоне R407C. С помощью программы исследовано влияние температурного напора сред на выходе из испарителя, конденсатора, промежуточного теплообменника и переохладителя на эксергетический КПД ТН. Рассмотрены три схемы компоновки основного оборудования ТН: пароконденсационная, с промежуточным теплообменником и схема с регенерацией теплоты и переохладителем.

Выявлена нецелесообразность использования в качестве испарителя и конденсатора ТН теплообменников одинакового типоразмера, поскольку в этом случае либо не достигается максимально возможный КПД, либо пренебрегается возможностью экономии на материале испарителя.

Ключевые слова: тепловой насос, математическая модель, эксергетический КПД.

Computer-aided Study of the Heat Pump Loop Exergic Efficiency with Approximating the Thermodynamic Properties of R407C Refrigerant

R.Sh. Ganeev, E.N. Samigullina, R.F. Mannanova

Ganeev Roman Sh. — Ph.D.-student of Avionics, Energy Engineering and Infocomm Technology Dept., Ufa State Aviation Technical University, e-mail: ganeevroman@rambler.ru

Samigullina Elmira N. — student of Avionics, Energy Engineering and Infocomm Technology Dept., Ufa State Aviation Technical University, e-mail: elwinasamigullina@yandex.ru

Mannanova Regina F. — student of Avionics, Energy Engineering and Infocomm Technology Dept., Ufa State Aviation Technical University, e-mail: reginamannanova@mail.ru

The development of a heat pump mathematical model and computer program with fully automated calculations is necessary for determining the optimal parameters of heat pump units (HPU). Proper selection of HPU operating parameters reduces the capital and operating costs for the installation.

Calculations cannot be fully automated unless a procedure for automatically determining the working fluid parameters at any point of the heat pump (HP) working process is elaborated. A procedure for obtaining polynomial expressions approximating the thermodynamic properties of R407C refrigerant is described, and the methods for automatically determining, by means of software, the working fluid properties through a search from tables and by using polynomial expressions are compared with each other.

A fully automated computer program for calculating the parameters of an HP operating on R407C refrigerant has been developed. The effect the temperature difference of fluids at the outlet from the evaporator, condenser, intermediate heat exchanger, and sub-cooler has on the HP exergy efficiency is investigated using the developed computer program. Three configurations of heat pump main equipment, namely, with vapor compression, with an intermediate heat exchanger, and with a sub-cooler and heat recovery are considered.

The study results have shown that it is inexpedient to use heat exchangers of the same standard size as the HP condenser and evaporator, because an attempt to use such solution results in either failure to attain the maximum possible efficiency or in discarding the possibility of saving on the evaporator's material.

Key words: heat pump, mathematical model, exergy efficiency.

Введение

Разработка и установка теплонасосных установок для отопления и кондиционирования различных объектов преследует цели обеспечения автономности от централизованного источника отопления, экономии энергоресурсов, использования теплоты низкопотенциальных источников [1].

Несмотря на то что ТНУ предполагает целый ряд преимуществ, то, в какой мере эти преимущества будут использованы, зависит от точности подбора оборудования, схемы и эффективности каждой системы, входящей в состав установки.

Можно отметить и тот факт, что причинами малой распространенности ТНУ являются: необходимость точных математических расчетов, отсутствие адекватных моделей для описания изменения термодинамических свойств фреонов в зависимости от температуры и давления [1].

Для автоматизации расчетов контура ТН, помимо которого в состав ТНУ входят контур отбора теплоты от низкопотенциального источника и контур отопления (кондиционирования) помещения, разработаны программы «Фреон R407C» и Heat pump Complete, позволяющие рассчитать термодинамические свойства фреона R407C и показатели работы теплового насоса на фреоне R407C, построить графики процессов для ТН трех конфигураций — парокompрессионного, с промежуточным теплообменником, с регенерацией теплоты и переохладителем [2].

На рис. 1 изображена схема ТН с регенерацией теплоты и переохладителем; для парокompрессионной схемы переохладитель и промежуточный теплообменник отсутствуют, для схемы с промежуточным теплообменником отсутствует переохладитель.

Описание программ

Программа предполагает полную автоматизацию расчетов и построения графиков протекающих процессов. Полная автоматизация достигается с помощью аппроксимации всех необходимых для расчетов свойств фреона как на линиях насыщения, так и в области

перегретого пара. Аппроксимация выполнена по приведенной далее методике и предполагает следующие особенности [3]:

- поиск полиномов выполнен в программе MS Excel. Использована функция «Линия тренда», которая строится в программе с использованием метода наименьших квадратов;

- для увеличения точности аппроксимации для каждого параметра получены два полинома: один для диапазона температур от $-60 \dots 0$ °C, второй для диапазона $-0 \dots 80$ °C;

- диапазон температур ниже -60 °C не рассматривается, так как не применяется в тепловых насосах;

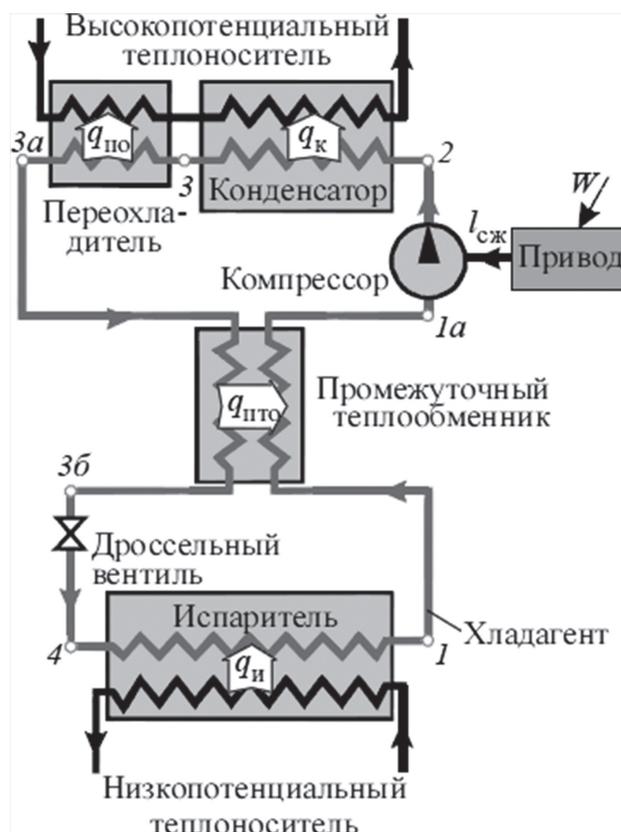


Рис. 1. Схема ТН с регенерацией теплоты и переохладителем

• в отличие от воды, у фреона R407C изобары и изотермы в области влажного пара не совпадают;

• расчеты в области перегретого пара затрудняются некоторыми моментами, а именно:

авторам удалось найти только один источник, содержащий данные для перегретого пара, однако в нем применяются британские единицы измерения;

параметры в области перегретого пара определяются совокупностью двух параметров — давления и температуры;

для каждого давления существует свой предел нижнего значения температуры, который соответствует температуре насыщенного пара при данном давлении.

В связи с указанным предлагается следующая методика:

• определяются полиномы для некоторых давлений;

• для определения искомого параметра по заданному давлению и температуре необходимо подставить температуру в два полинома для ближайшего большего и ближайшего меньшего давления, далее методом интерполяции найти значение для заданного давления.

В табл. 1 представлены аргументы всех полиномов, полученных для линии насыщения с указанием максимальной погрешности данных, найденных как расхождение между показателем, полученным по полиному, и табличному значению.

Полиномы для определения энтальпии и энтропии перегретого пара фреона R407C для некоторых давлений приведены в табл. 2 (значения давления не кратны

10, 100 и т. д., так как данные получены из британской системы единиц).

Для верификации полиномов свойств фреона разработана самостоятельная программа «Фреон R407C», позволяющая определить параметры фреона в любой области и построить изолинии процессов на P, h - и t, s -диаграммах при постоянных температуре, давлении, объеме и т.д.

Исходные данные

Исходные данные, такие, как температуры низко- и высокопотенциальных носителей на входе и выходе из теплообменников ТН, приняты по данным, полученным на реальном объекте, описанном в [1].

Влияние на эксергетический КПД установки таких начальных параметров, как температурный напор на выходе из испарителя и конденсатора, перегрев в промежуточном теплообменнике и температурный перепад в переохладителе, являются объектом настоящего исследования.

Использованы порядок термодинамического расчета и расчетные зависимости, приведенные в [2, с. 43].

Результаты расчетов в программе

Результатами расчета программы являются параметры во всех характерных точках трех различных циклов; теплота, отданная в конденсаторе и полученная испарителем; работа сжатия, степень повышения давления в компрессоре, эксергетический КПД и другие показатели энергетической эффективности работы ТН (см. [2]).

Таблица 1

Полиномы для определения свойств фреона R407C на линии насыщения

Параметр	Фаза	Диапазон температур, °C		Аргументы полинома					Максимальная погрешность, %
				t^4	t^3	t^2	t	0	
Давление, кПа	Жидкость	-60	0	0	9,4259E-04	0,21591	18,303	567,21	0,354
		0	80	0	0,0015	0,2096	18,77	566,82	0,131
	Пар	-60	0	0	9,3968E-04	0,20133	15,9049	459,83	0,676
		0	80	0	2,3414E-03	0,14158	17,66696	454,61	0,981
Энтальпия, кДж/кг	Жидкость	-60	0	0	0,000006	0,0016	1,4167	199,99	0,092
		0	80	0	8,31E-05	-0,0042	1,5513	199,5	0,292
	Пар	-60	0	0	-0,000008	-0,0018	0,4861	409,51	0,053
		0	80	0	-4,72E-05	-0,0011	0,4734	409,53	0,552
Энтропия, кДж/кг·К	Жидкость	-60	0	0	4,38E-08	-3,60E-06	0,0051448	1,00	0,011
		0	80	0	2,2540E-04	-1,93E-02	5,4901	0,998506	0,173
	Пар	-60	0	0	-1,18E-07	0,000004153	-0,001049	1,79264	0,021
		0	80	0	-2,9 E-07	2,2236E-6	-1,377 E-03	1,7941	0,177
Удельный объем, м³/кг	Жидкость	-60	0	0	4,51E-11	1,1501E-08	2,3537E-06	0,000809	0,003
		0	80	0	1,5215E-09	-1,0473E-07	5,0619E-06	0,000797	1,461
	Пар	-60	0	9,6238E-08	6,661E-06	0,000250221	0,0006844	0,058421	2,18
		0	80	9,9211E-10	-2,6066E-07	0,000028087	-0,0016692	0,050649	1,382

Таблица 2

Полиномы для определения энтальпии и энтропии фреона R407C в области перегретого пара

Давление, кПа	Диапазон температур, °С		Аргументы полинома			Максимальная, погрешность, %
			t^2	t	θ	
Энтальпия, кДж/кг						
69	-44	126,7	0,000780317	0,788685	420,0014	0,029
172	-24,8	143,3	0,000677809	0,798215	418,4207	0,012
345	-7,5	160	0,000697334	0,818438	415,6314	0,099
1035	26,1	193,3	0,000557867	0,886544	403,4513	0,057
1793	46,5	215,6	0,000322773	0,584831	387,5986	0,092
2482	59,8	226,7	-5,37877E-05	1,150182	366,5461	0,305
3103	69,5	237,8	-0,000107622	1,204296	353,9824	0,155
3792	78,5	248,9	-0,000812394	1,491969	320,8777	0,494
Энтропия, кДж/кг·К						
69	-44	126,7	-1,76143E-06	0,002874	1,988576	0,019
172	-24,8	143,3	-1,62755E-06	0,002874	1,897367	0,021
345	-7,5	160	-1,81164E-06	0,002925	1,823730	0,059
1035	26,1	193,3	-2,16727E-06	0,003117	1,689844	0,069
1793	46,5	215,6	-2,58567E-06	0,003343	1,601982	0,939
2482	59,8	226,7	-2,60449E-06	0,003456	1,544285	0,109
3103	69,5	237,8	-3,54391E-06	0,003858	1,474414	0,192
3792	78,5	248,9	-5,46002E-06	0,004627	1,372242	0,462

По результатам расчета для каждой схемы автоматически строятся P, h - и t, s -диаграммы процессов.

Ход исследования

Методика исследования

Суть исследования заключается в расчете эксергетического КПД с помощью созданной программы при варьировании следующих параметров:

- для парокompрессионной установки исследуется влияние температурных перепадов на выходе из испарителя и конденсатора как по отдельности, так и в совокупности; базовый перепад составляет 5 °С;
- для схемы с промежуточным теплообменником (ПТО) исследуется влияние величины перегрева в ПТО;
- для схемы с регенерацией теплоты и переохладителем исследуется влияние величины температурного перепада в переохладителе.

Парокompрессионный цикл

Влияние температурного недогрева для конденсатора и испарителя на эксергетический КПД ТН показано на рис. 2. Из представленных зависимостей видно, что больший вклад в увеличение эксергетического КПД вносит уменьшение недогрева в конденсаторе. На рис. 2 изображены линии для трех наборов параметров, которые, однако, не отражают все возможные комбинации недогревов в испарителе и конденсаторе, в связи с чем была построена плоскость, для этого созданная программа была изменена на выполнение двой-

ного цикла, было выполнено 400 вычислений с шагом 1 °С по каждой оси (рис. 3).

Цикл с промежуточным теплообменником

Так как для цикла с промежуточным теплообменником число варьируемых параметров равно трем, задача определения КПД при всех совокупностях параметров становится трехмерной. В связи с этим были построены только некоторые зависимости, позволяющие наблюдать влияние на КПД цикла не только перегрева в ПТО, но и температурных перепадов на выходе из конденсатора и испарителя (рис. 4). Отмечено, что для цикла с ПТО, так же как и для парокompрессионного цикла, большее значение имеет перепад в конденсаторе.

Важным является также тот факт, что при увеличении перегрева в ПТО эксергетический КПД не растет, как можно было бы предположить, а падает. Связано это с тем, что работа сжатия фреона, а следовательно, и затраты электроэнергии на привод компрессора увеличиваются быстрее, чем эксергия, полученная высокопотенциальным теплоносителем в конденсаторе. Для некоторых значений перегрева в ПТО КПД может быть меньшим, чем для парокompрессионного цикла. Наиболее целесообразно применение ПТО при необходимости увеличения температуры фреона после компрессора.

Цикл с регенерацией теплоты и переохладителем

Исследование аналогично циклу с ПТО за исключением добавления четвертого параметра — температурного перепада в переохладителе, кроме того, температурный перепад в переохладителе ограничен

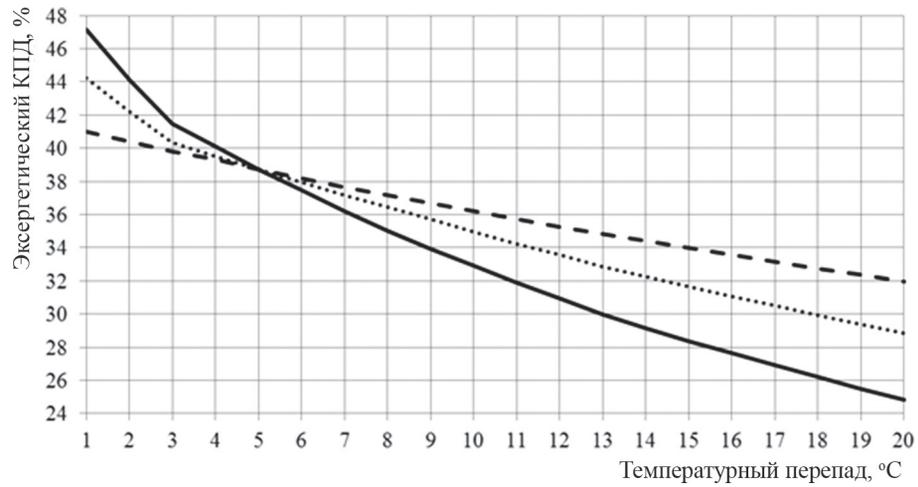


Рис. 2. Зависимость эксергетического КПД парокompрессионного цикла теплового насоса от температурного перепада на выходе из испарителя и конденсатора:

— — — влияние температурного перепада в испарителе; — влияние температурного перепада в конденсаторе; — — — совместное влияние температурных перепадов

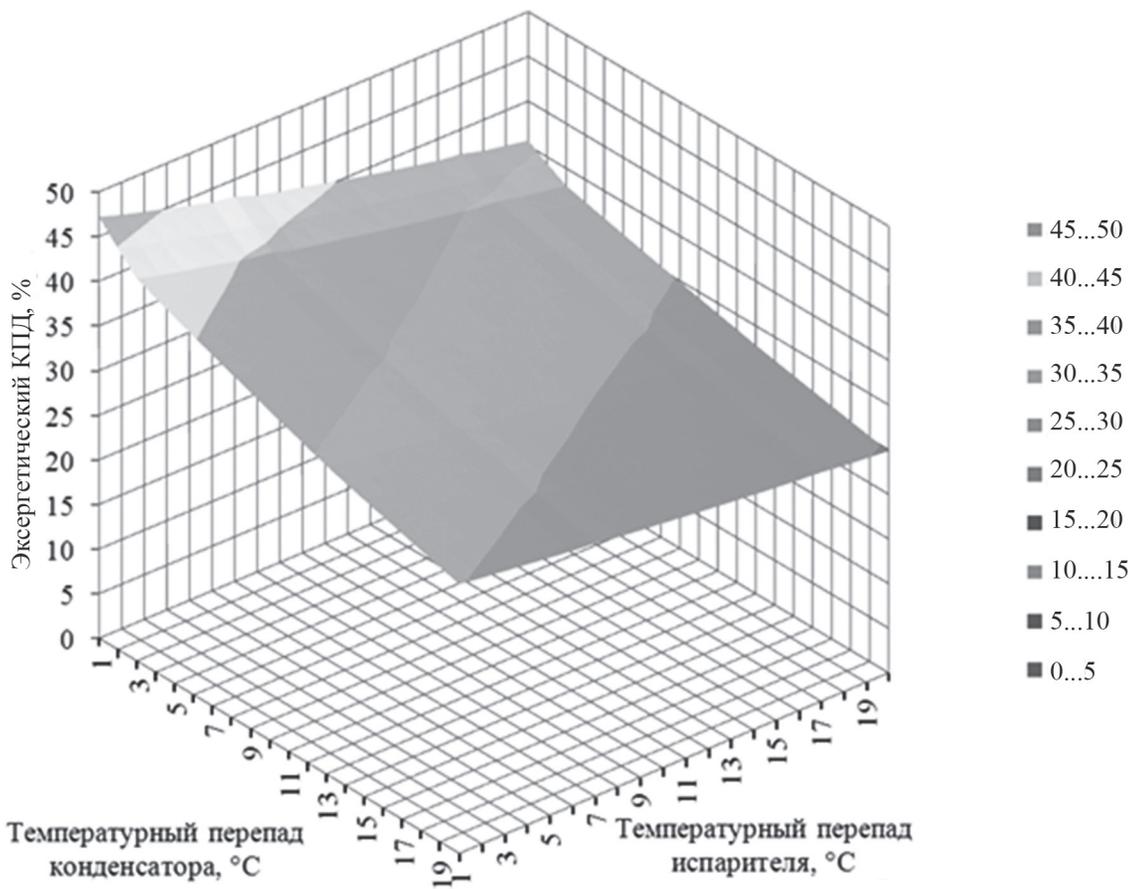


Рис. 3. Плоскость значений эксергетического КПД парокompрессионного цикла теплового насоса

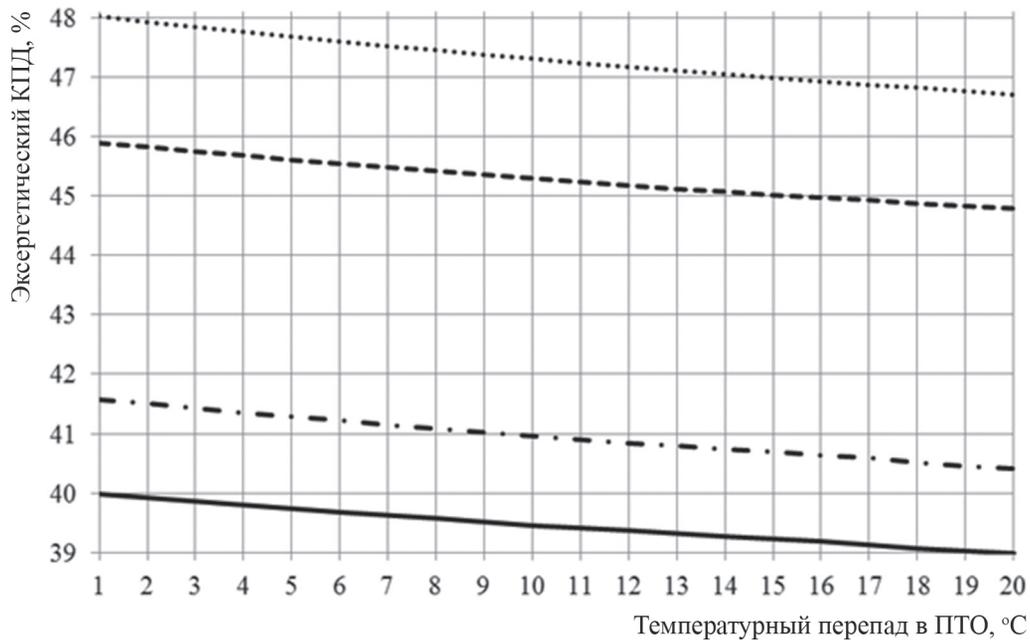


Рис. 4. Зависимость эксергетического КПД цикла с промежуточным теплообменником от варьируемых параметров:

- недогрев в конденсаторе 5 °C, недогрев в испарителе 5 °C;
- недогрев в конденсаторе 1 °C, в испарителе 1 °C;
- - -— недогрев в конденсаторе 5 °C, в испарителе 1 °C;
- - -— недогрев в конденсаторе 1 °C, в испарителе 5 °C

температурой высокопотенциального теплоносителя на входе в него, поэтому зависимости могут быть построены в меньшем диапазоне температур (рис. 5).

Наибольшее влияние на КПД цикла также оказывает перепад температур на выходе из конденсатора. Уменьшение перегрева в ПТО приводит к увеличению

КПД, что согласуется с результатами в предыдущем пункте. Увеличение количества теплоты, используемой в переохладителе, способно значительно увеличить эксергетический КПД установки, однако имеет ограничения по возможности увеличения, налагаемые вторым законом термодинамики.

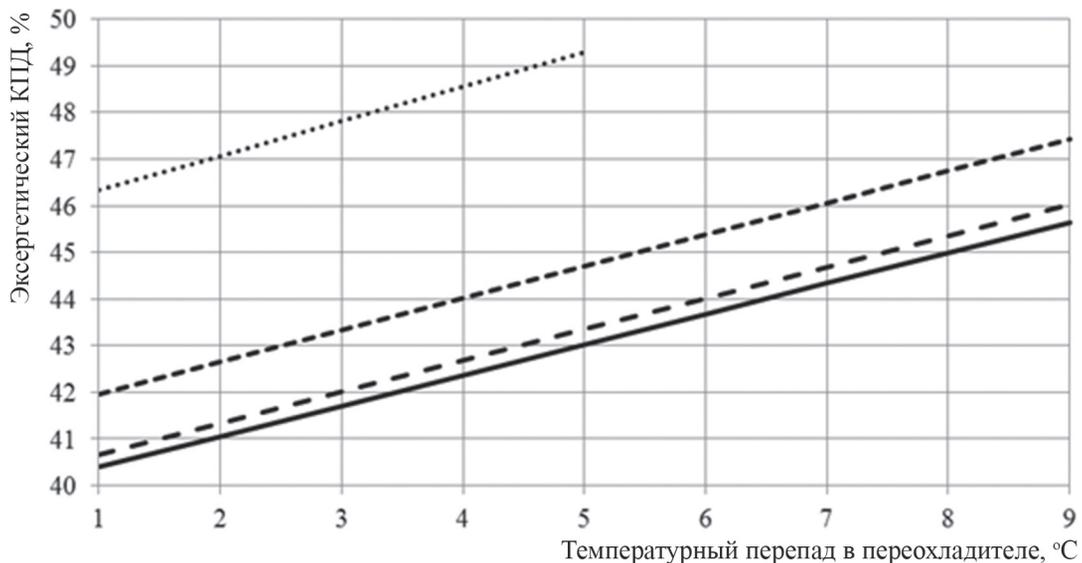


Рис. 5. Зависимость эксергетического КПД цикла с регенерацией теплоты и переохладителем от варьируемых параметров:

- недогрев в конденсаторе 5 °C, недогрев в испарителе 5 °C, перегрев в ПТО 5 °C;
- - -— недогрев в конденсаторе 5 °C, недогрев в испарителе 1 °C, перегрев в ПТО 5 °C;
- недогрев в конденсаторе 1 °C, недогрев в испарителе 5 °C, перегрев в ПТО 5 °C;
- - -— недогрев в конденсаторе 5 °C, недогрев в испарителе 5 °C, перегрев в ПТО 1 °C

Заключение

По результатам исследования сделаны следующие выводы и рекомендации:

- величина температурного перепада на выходе из конденсатора имеет большее влияние на величину эксергетического КПД для всех трех циклов по сравнению с температурным перепадом на выходе из испарителя;

- применение ПТО целесообразно для достижения определенных целей, таких, как повышение температуры фреона на выходе из компрессора, но не для повышения эксергетического КПД;

- использование переохладителя значительно повышает эксергетический КПД, который возрастает с ростом температурного перепада в нем.

В связи с изложенным представляется нецелесообразным использование в качестве испарителя и конденсатора ТН теплообменников одинакового типоразмера, как это можно наблюдать на примере многих производимых ТН, поскольку в этом случае либо не достигается максимально возможный эксергетический КПД, либо пренебрегается возможностью экономии на материале испарителя.

Тем не менее необходимо учитывать тот факт, что уменьшение температурного напора, увеличение использования количества теплоты в теплообменниках означает увеличение их габаритов и, соответственно, стоимости. При проектировании необходимы расчеты окупаемости для каждого конкретного случая. Также необходимо помнить, что сказанное относится к тепловым насосам на фреоне R407C и может быть несправедливо по применению к ТН с другими рабочими телами.

Литература

1. Ганеев Р.Ш., Самигуллина Э.Н., Игнатъев Д.В., Маннанова Р.Ф. Проект использования теплонасосных установок для отопления и кондиционирования частных домов // Молодежный Вестник УГАТУ. 2016. №1(14). С. 194.

2. Трубаев П.А., Гришко Б.М. Тепловые насосы: учеб. пособие. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2009.

3. Ганеев Р.Ш., Самигуллина Э.Н., Маннанова Р.Ф. Аппроксимация свойств фреона R407c на линии насыщения, в области насыщенного и перегретого пара полиномами третьего и четвертого порядка // Молодежный Вестник УГАТУ. 2016. № 1. С. 209.

References

1. Ganeev R.Sh., Samigullina E.N., Ignatiev D.V., Mannanova R.F. Proekt Ispol'zovaniya Teplonasosnyh Ustanovok dlja Otoplenija i Kondicionirovanija Chastnyh Domov. Molodezhnyj Vestnik UGATU. 2016;1(14):194. (in Russian).

2. Trubaev P.A., Grishko B.M. Teplovyje Nasosy: ucheb. posobie. Belgorod: Izd-vo BGTU im. V.G. Shuhova, 2009. (in Russian).

3. Ganeev R.Sh., Samigullina Je.N., Mannanova R.F. Approksimacija Svoystv Freona R407c Na Linii Nasyshhenija, v Oblasti Nasyshhennogo i Peregretogo Para Polinomami Tret'ego i Chetvertogo Porjadka. Molodezhnyj Vestnik UGATU. 2016;1:209. (in Russian).

Статья поступила в редакцию 19.07.2016