



Рис. 3 – Затрати на термодоготовку води теплоносителем от котельной и теплонасосной установкой

Литература

1. Проскуренко И.В. Замкнутые рыболовные установки. – М.: Издательство ВНИРО, 2003. – 152 с.
2. Тепловые насосы // Материалы электронного журнала «ЭСКО». – 2009. – № 2.

УДК 664(620.9):621.56/59

ПОЛУЧЕНИЕ ХОЛОДА ЗА СЧЁТ ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Плишко О.С., студентка, Геллер В.З., д-р техн. наук, профессор
Одесская государственная академия холода, г. Одесса

Обоснована целесообразность применения пароэжекторной холодильной машины, использующей в качестве источника энергии вторичное тепло пищевых предприятий. В качестве рабочих веществ пароэжекторных холодильных машин рассмотрены хладоны R142b, R236fa, RC318 и R600a. Для хладона R142b экспериментально исследованы термодинамические свойства (давление насыщенных паров и плотность жидкости на линии насыщения), разработано уравнение состояния, термодинамические таблицы и диаграммы, что позволило определить термодинамические свойства в ключевых точках цикла и рассчитать его основные тепловые и холодильные характеристики.

Expedience of application of vapourejector of refrigeration machine, using the second heat of food enterprises as an energy source is grounded. As workings matters of vapourejector of refrigeration machines the refrigerant of R142b, R236fa, RC318 and R600a, are considered. For the of refrigerant R142b thermodynamics properties (pressure of the saturated steams and closeness of liquid on the line of satiation) are experimentally investigational, equalization of the state, thermodynamics tables and diagrams, is developed, that allowed to define thermodynamics properties in the key points of cycle and expect his basic thermal and refrigeration descriptions.

Ключевые слова: пароэжекторная холодильная машина, хладоны, термодинамические свойства, давление, плотность, уравнение состояния.

Получение искусственного холода играет важную роль в любом производстве, включая производство пищевых продуктов. Охлаждение требуется как для реализации ряда технологий, так и для кондиционирования воздуха в производственных и офисных помещениях. Последнее особенно важно в связи с возросшими требованиями Всемирной организации здравоохранения к качеству воздуха внутри помещений [1]. В настоящей работе рассматривается возможность производства искусственного холода за счёт вторичных энергоресурсов пищевых производств путём применения пароэжекторной холодильной ма-

шины (ПЭХМ). В отличие от парокомпрессионных холодильных машин, где затрачивалась механическая энергия для привода компрессора, в ПЭХМ подводится теплота от низкопотенциального источника (с температурой 200...250 °С), а сжатие происходит в струйном компрессоре-эжекторе. Эти машины просты по конструкции, надежны и безопасны в эксплуатации. Хладагент — чаще всего вода, но могут быть использованы аммиак и хладоны. Термодинамическая эффективность ПЭХМ несколько меньше, чем у холодильной машины, совершающей только обратный цикл. Однако, использование вторичных энерго-ресурсов в качестве источника тепла делает применение такой машины целесообразным и эффективным с эколого-энергетической точки зрения.

Эффективность работы холодильной машины, реализующей такой цикл, в большой мере зависит от выбора рабочего вещества. Такой холодильный агент должен обеспечивать кипение на уровне температур 0...минус 10 °С и конденсацию на уровне температур 30...40 °С. Анализ показал, что в наибольшей степени указанным требованиям соответствует 1-хлор-1,1-дифторэтан — хладон R142b (CClF₂CH₃). Это вещество имеет наиболее подходящие для решения данной проблемы термодинамические свойства (нормальная точка кипения минус 9,11 °С, критическая температура 137,11 °С, критическое давление 4,07 МПа). Другим преимуществом этого рабочего вещества является возможность перезарядки системы без особых затруднений, поскольку смазочные масла, обычно применяемые в компрессорных системах, в этом случае не требуются.

Для расчёта и анализа цикла ПЭХМ необходим набор данных по термодинамическим свойствам рабочего вещества, и, в первую очередь, уравнение состояния. Анализ литературных данных показал, что, к сожалению, имеющаяся информация ограничена и не позволяет решить поставленную задачу без дополнительных экспериментов. В связи с этим, одной из задач нашего исследования являлось экспериментальное определение термодинамических свойств хладона R142b (давления насыщенных паров и плотности жидкости на линии насыщения) в диапазоне температур минус 20...50 °С. Такая экспериментальная информация является минимально необходимой для составления уравнения состояния и позволяет при её использовании рассчитать точные таблицы термодинамических свойств для определения параметров ключевых точек цикла.

Опыты проводились с помощью измерительной ячейки, сконструированной из стального цилиндра из нержавеющей стали и сапфировой визуальной трубки. Измерительная ячейка рассчитана на давление до 1,5 МПа. Ячейка помещена в термостат, имеющий смотровые окна для наблюдения за уровнем жидкости внутри ячейки и измерением высоты этого уровня с помощью катетометра КМ-6. Объём ячейки был калиброван по дистиллированной воде перед началом измерений. Прозрачная трубка позволяла определять уровень жидкости и, таким образом, объём системы, занятый жидкой фазой. Дизайн этого измерительного устройства исключал конденсацию хладона в линии, соединяющей ячейку и датчик давления. Масса жидкости в измерительной ячейке определялась путём взвешивания исследуемого образца на аналитических весах ВЛА-200 с погрешностью ±0,002 г.

Образец хладона заполнял ячейку, «мёртвое» пространство в ячейке было минимизировано и количество хладона в паровой фазе в «мёртвом» пространстве при экспериментальной температуре и давлении рассчитывалось с использованием уравнения состояния. Температура опыта измерялась платиновым термометром сопротивления типа ПТС-100. Экспериментальная погрешность в измерении температуры оценивалась ±20 мК. Давление измерялось тензометрическим датчиком давления типа Сапфир — 22 ДИ, калиброванным по грузопоршневому манометру МП-60. Оцененная погрешность измерения давления была меньше, чем ±8 кПа. Объём ячейки при калибровке был определён с погрешностью ±0,04 %. В общем, погрешность измерений давления насыщенных паров и плотности жидкости оценена ±12 кПа и 0,1 % соответственно. Результаты измерений приведены в табл. 1. Сравнение полученных нами результатов с литературными данными представлено в табл. 2.

Таблица 1 – Экспериментальные данные о давлении насыщенных паров и плотности кипящей жидкости хладона R142b

Температура, °С	Давление, МПа	Плотность, кг/м ³
-20,01	0,063	1214,3
-10,12	0,097	1192,2
-0,10	0,144	11,69,5
9,96	0,206	1146,1
20,07	0,288	1121,8
29,92	0,392	1096,6
40,03	0,522	1070,2
49,90	0,682	1042,4

Таблица 2 – Отклонение экспериментальных данных о давлении насыщенных паров (ΔP) и плотности кипящей жидкости ($\Delta \rho$) хладона R142b от данных [2]

Температура, °С	ΔP , %	$\Delta \rho$, %
-20,01	-1,75	-0,46
-10,12	-1,54	-0,48
-0,10	-1,48	-0,52
9,96	-1,41	-0,61
20,07	-1,46	-0,60
29,92	-1,54	-0,64
40,03	-1,66	-0,67
49,90	-1,73	-0,72

Как видно, отклонения наших экспериментальных данных от термодинамических свойств, полученных Хьюбером и Эли [2] методами теории подобия и заложенных в REFPROP [3], весьма существенны. В связи с этим, уравнение состояния R142b было скорректировано по полученным нами экспериментальным данным. Уравнение представлено в виде модифицированного уравнения Бенедикта – Вебба – Рубина (БВР), которое в настоящее время принято в качестве международного стандарта для описания термодинамических свойств веществ [4, 5]. Это уравнение описывает давления как функцию температуры и плотности

$$P = \sum_{n=1}^9 a_n \rho^n + \exp \left[\left(\rho / \rho_c \right)^2 \right] \sum_{n=10}^{15} a_n \rho^{2n-17},$$

где a_i — подгоночные параметры;

ρ — плотность;

ρ_c — критическая плотность.

Уравнение БВР использовано для расчёта термодинамических свойств (давления, плотности, энтальпии и т. д.) для состояния кипящей жидкости и сухого насыщенного пара (результаты расчёта даны в табл. 3), а также для построения термодинамических диаграмм состояния.

Таблица 3 – Термодинамические свойства хладона R142b

Темп., °С	Давл., МПа	Плотность, кг/м ³		Энтальпия, кДж/кг		Энтропия, кДж/(кг·К)	
		жидкость	пар	жидкость	пар	жидкость	пар
-30	0,0399	1235,7	2,036	163,7	397,3	0,860	1,820
-20	0,0637	1214,1	3,152	175,4	403,8	0,908	1,809
-10	0,0977	1192,0	4,701	187,7	410,3	0,954	1,800
0	0,145	1169,3	6,790	200,0	416,8	1,000	1,794
10	0,207	1145,9	9,539	212,5	423,3	1,045	1,789
20	0,289	1121,6	13,09	225,3	429,7	1,089	1,786
30	0,393	1096,3	17,60	238,3	436,0	1,132	1,784
40	0,523	1069,9	23,27	251,7	442,1	1,175	1,783
50	0,684	1042,1	30,33	265,3	448,0	1,218	1,783
60	0,878	1012,7	39,07	279,4	453,7	1,260	1,783
70	1,111	981,2	49,90	293,8	459,0	1,302	1,783
80	1,386	947,3	63,35	308,8	463,9	1,344	1,783
90	1,709	910,1	80,20	324,3	468,1	1,387	1,783
100	2,084	868,5	101,7	340,6	471,5	1,430	1,780
110	2,519	820,4	130,1	358,0	473,5	1,474	1,776
120	3,020	761,3	170,1	376,9	473,4	1,521	1,767
130	3,599	676,3	236,8	399,3	468,2	1,575	1,747

Данные о термодинамических свойствах для расчёта ключевых точек цикла позволили рассчитать холодильные и тепловые коэффициенты необратимого и обратимого циклов, коэффициент термодинамического совершенства, а также удельную массовую холодопроизводительность холодильного агента. Анализ показал, что повышение температуры греющего источника до 378 К и температуры кипения хладона R142b в парогенераторе до 373 К уменьшает кратность циркуляции до 0,5 и увеличивает теоретический коэффициент теплового использования до 2,1. Однако, это приводит к росту давления в генераторе свыше 20 бар, что по прочностным условиям приведёт к повышению металлоёмкости холодильной машины.

Таким образом, хладон R142b может быть рекомендован для использования в качестве рабочего вещества пароэжекторной холодильной машины. Вместе с тем, молекулы R142b содержат атомы хлора, которые, как известно, разрушают молекулы озона в верхних слоях атмосферы. Это накладывает ограничения на применение этого вещества в реальных холодильных машинах.

Наряду с R142b в данной работе были проанализированы следующие вещества как потенциальные рабочие тела ПЭХМ: гексафторпропан $C_3H_2F_6$ (R236fa), октафторциклобутан $C_4H_8F_{10}$ (RC318) и изобутан C_4H_{10} (R600a).

Таблица 4 – Свойства потенциальных рабочих веществ для ПЭХМ

Название	Химическая формула	Нормальная температура кипения	Критические параметры		Озоно-разрушающие элементы	Пожаро-опасность
			T, °C	P, MPa		
R142b	$C_2H_3ClF_2$	-9,1	137,1	4,07	да	нет
R236fa	$C_3H_2F_6$	-1,4	124,9	3,20	нет	нет
RC318	$C_4H_8F_{10}$	-6,0	115,2	2,78	нет	нет
R600a	C_4H_{10}	-11,7	134,7	3,64	нет	да

Анализ показал, что по основным показателям эффективности цикл пароэжекторной холодильной машины соизмерим с циклом парокомпрессионной холодильной машины. Одним из главных характеристик работы холодильного цикла является удельная массовая холодопроизводительность (q_o). Сравнение результатов расчета q_o для исследованных нами веществ дано в табл. 5. Как видно из этой таблицы, преимуществ имеют вещества, неблагоприятные с экологической точки зрения (озоноразрушающие элементы, пожароопасность).

Таблица 5 – Результаты расчета холодопроизводительности

Вещество	q_o , кДж/кг
1-хлор-1,1-дифторэтан	178
гексафторпропан	160
октафторциклобутан	128
изобутан	316

Выводы

Результаты исследований показали возможность применения хладонов R142b, R236fa, RC318 и R600a как рабочих веществ пароэжекторных холодильных машин, использующих в качестве источника энергии вторичное тепло пищевых предприятий. Для хладона R142b экспериментально исследованы термодинамические свойства (давление насыщенных паров и плотность жидкости на линии насыщения), разработано уравнение состояния, термодинамические таблицы и диаграммы, что позволило определить термодинамические свойства в ключевых точках цикла и рассчитать его основные тепловые и холодильные характеристики.

Литература

1. Air Quality Guidelines. Global Update 2005 for Europe/DK – 2100. Copenhagen, Denmark, 2005, 485 с.
2. Huber, M. L. and Ely, J. F. A predictive extended corresponding states model for pure and mixed refrigerants including an equation of state for R134a // Int. J. Refrigeration. – Vol. 17. – P. 18-31, 1994
3. Lemmon, E. W., McLinden, M. O., and Huber M. L. NIST Thermodynamic and Transport Properties of Refrigerants and Refrigerant Mixtures – REFPROP, Version 8.0. NIST, USA, 2007.
4. Geller, V. Measurements and model development for R400 series refrigerants. In Proc. of ASHRAE Winter Meeting, Honolulu, USA, 2003.
5. Lemmon, E.W. and Jacobsen, R.T. An International Standard Formulation for the Thermodynamic Properties of Refrigerants. J. Phys. Chem. Ref. Data. – Vol. 58. – №. 4. – P.44-52, 2007.