

ИНЖЕНЕРНОТО ПРАВИЛО: 1 К – 3 %

Светослав Влашки

В инженерната практика е прието принципно правило за приблизителна оценка на ефекта от промяната на температурите на изпарение и кондензация върху характеристиките на хладилната машина: „1 К – 3 %“. Тазмесечното издание на рубриката „Хладилни системи“ ще използва конкретни примери, чрез които да демонстрира основните принципи, по които промяната в термодинамичните параметри на хладилния агент води до изменение в мощността и ефективността на хладилната машина.

Понижаване на температурата на изпарение

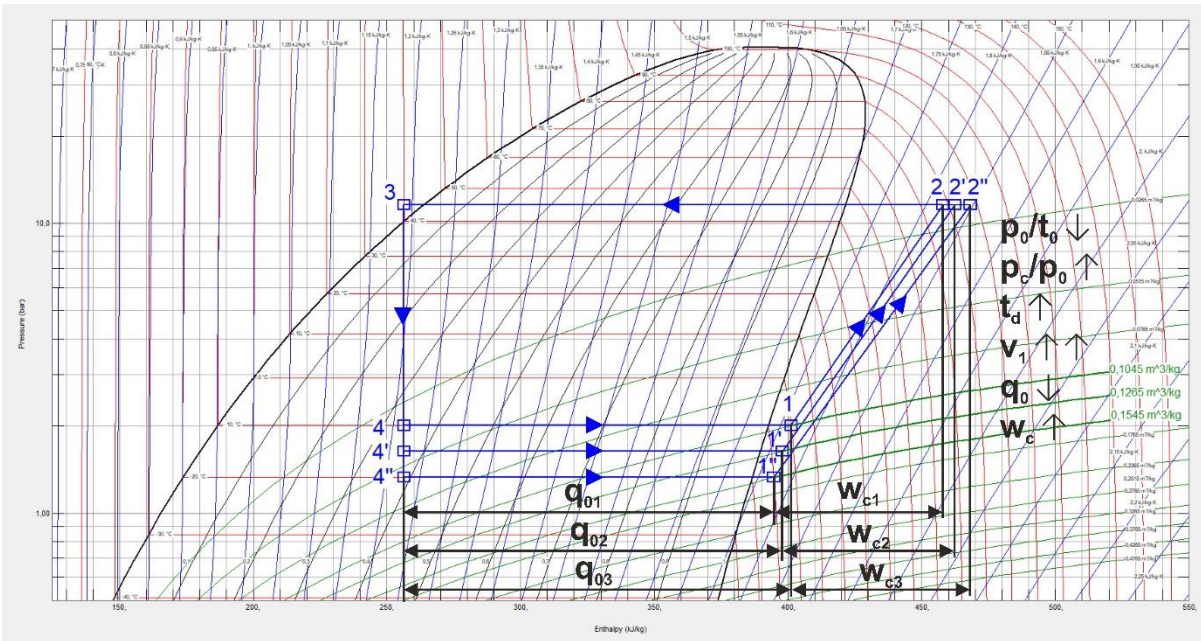
С цел коректно да се анализира изолираното влияние на температурата на изпарение върху характеристиките на хладилната машина, температурата на кондензация и подохлаждането, респективно специфичната енталпия на входа на изпарителя, и прегревят се приемат за постоянни.

На Фигура 1 е показана log p-h диаграма, чрез която се демонстрира ефектът от понижаване на температурата на изпарение (t_0). В конкретния пример с R134a, при понижаване на t_0 от -10 на -11 °C, специфичната масова студопроизводителност (q_0) намалява от 144,8 на 144,2 kJ/kg, т.е. с 0,44 %, а специфичната работа на компресора (w_c) се увеличава от 56,8 на 57,5 kJ/kg, т.е. с 1,11 %. Тези стойности показват, че влиянието на q_0 и w_c е минимално. Определящият параметър при промяна в температурата на изпарение е специфичният обем на входа на компресора (v_1). Причината е, че специфичната обемна студопроизводителност (q_{0v}) и съответно пълната хладилна мощност на компресора (\dot{Q}_0) са в директна зависимост от v_1 :

$$q_{0v} = \frac{(h_1 - h_4)}{v_1} = \frac{q_0}{v_1}, \left[\frac{kJ}{m^3} \right]$$

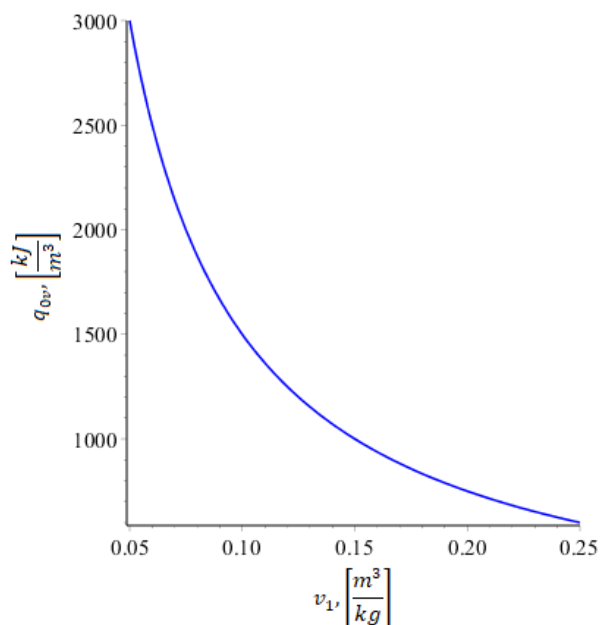
h_1 и h_4 са специфичните енталпии, съответно на изхода и на входа на изпарителя.

В настоящия пример, специфичният обем на входа на компресора се увеличава от 0,10448 до 0,10489 m³/kg, т.е. с 3,7 %. Посочените стойности за параметрите на хладилния агент са определени със софтуерната програма REFPROP, използваща най-точните математически модели за изчисляване на термодинамичните и преносни свойства на флуиди.



Фигура 1. log p-h диаграма, демонстрираща ефекта от понижаване на температурата на изпарение върху параметрите на хладилния цикъл

Тъй като функцията е дробна, изменението на специфичната обемна студопроизводителност е нелинейно. Отчетеното увеличаване на специфичния обем с 3,7 %, води до намаляване на студопроизводителността с 4,12 %. Графика на функцията е показана на Фигура 2.



Фигура 2. Графика на функцията, описваща изменението на специфичната обемна студопроизводителност като функция от специфичния обем при постоянна енталпийна разлика в изпарителя

Пълната хладилна мощност на компресора се дефинира чрез следната зависимост:

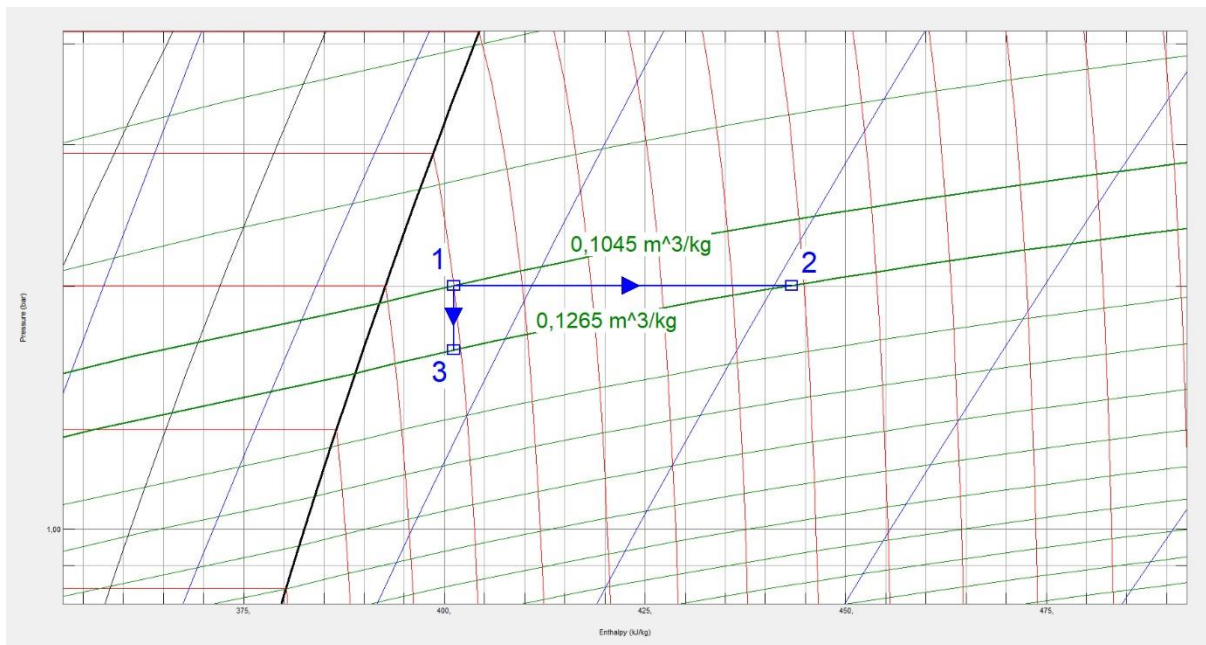
$$\dot{Q}_0 = \dot{V}_0 \times q_{0v}, [kW]$$

\dot{V}_0 представлява реалният обеман дебит на хладилния агент, който компресорът осигурява. Той се определя като произведение от геометричния обеман дебит и обемната ефективност на компресора:

$$\dot{V}_0 = \dot{V}_{geo} \times \eta_{vol}, \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

При понижаване на температурата и съответно налягането на изпарение, отношението на сгъстяване се увеличава и това води до намаляване на обемната ефективност. Резултатът е допълнително редуциране на \dot{Q}_0 .

Показателно е сравнението при промяна в специфичния обем, при дадено изменение в температурата на изпарение и температурата на прегретите пари. От Фигура 3 се вижда, че стойността на специфичния обем е значително по-чувствителна към промяна в температурата на насищане, отколкото в температурата на прегретите пари.



Фигура 3. log p-h диаграма, демонстрираща промяната в специфичния обем, при дадено изменение в температурата на изпарение и температурата на прегретите пари

Следващите два примера демонстрират с конкретни стойности промяната на характеристиките на хладилната система в среднотемпературния и нискотемпературния диапазон при понижаване на температурата на изпарение. Температурата на кондензация, прегревът и подохлаждането се приемат за постоянни.

Параметър	Означение	Дименсия	Стойност					
Хладилен агент	R134a	[-]	-					
Темп. на изпарение	t_0	[°C]	-10,0	-11,0	-12,0	-13,0	-14,0	-15,0
Прегрев	Δt_{0h}	[K]	10					
Темп. на кондензация	t_c	[°C]	45					
Подохлаждане	Δt_{cu}	[K]	5					
Хладилна мощност	\dot{Q}_0	[kW]	9,89	9,40	8,92	8,46	8,01	7,59
Електрическа мощност	P	[kW]	4,01	3,92	3,83	3,75	3,66	3,57
Ефективност	EER	[-]	2,47	2,40	2,33	2,26	2,19	2,12
Процентна промяна в ефективността	-	[%]	-	-2,8	-2,9	-3,0	-3,1	-3,2

Параметър	Означение	Дименсия	Стойност					
Хладилен агент	R404A	[-]	-					
Темп. на изпарение	t_0	[°C]	-30	-31	-32	-33	-34	-35
Прегрев	Δt_{0h}	[K]	10					
Темп. на кондензация	t_c	[°C]	45					
Подохлаждане	Δt_{cu}	[K]	5					
Хладилна мощност	\dot{Q}_0	[kW]	13,62	12,81	12,03	11,28	10,56	9,88
Електрическа мощност	P	[kW]	10,35	10,03	9,71	9,39	9,07	8,75
Ефективност	EER	[-]	1,32	1,28	1,24	1,20	1,16	1,12
Процентна промяна в ефективността	-	[%]	-	-3,0	-3,1	-3,2	-3,3	-3,4

При понижаване на температурата на изпарение, специфичната масова студопроизводителност и обемната ефективност на компресора намаляват минимално. Поради нелинейното изменение на q_{0v} , обаче, пълната хладилна мощност се редуцира съществено. Понижаването на електрическата мощност е ограничено, вследствие на противоположните ефекти на по-високата специфична работа на компресора и по-ниския масов дебит на хладилния агент. Резултатът е значително редуциране на ефективността на хладилната системата, с приблизително 3 % за 1 К.

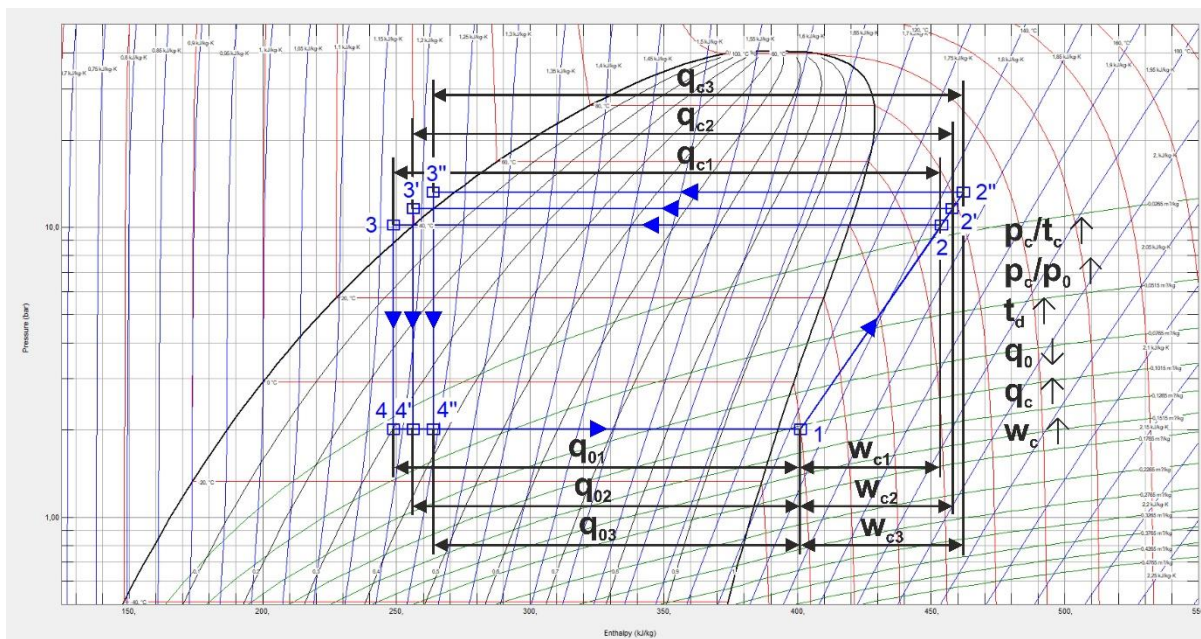
Повишаване на температурата на кондензация

Аналогично на предходната точка, при анализа на влиянието на температурата на кондензация, останалите параметри на хладилния цикъл се приемат за постоянни.

На Фигура 4 е демонстриран ефектът от повишаване на температурата на кондензация в log p-h диаграма. В конкретния пример с R410A, при повишаване на t_c от 45 на 46 °C, специфичната масова студопроизводителност се редуцира от 162,11 на 160,28 kJ/kg, т.е. с 1,1 %, вследствие на увеличаване на специфичната енталпия на входа на изпарителя от 265,94 на 267,77 kJ/kg, т.е. с 0,7 %. Едновременно е налице негативният ефект от увеличаване на специфичната работа на компресора от 66,93 на 68,50 kJ/kg, т.е. с 2,3 %. Двата параметъра q_0 и w_c се изменят почти линейно. Изоентропната ефективност на компресора остава, на практика, постоянна.

При повишаване на t_c , вследствие на излишък на хладилен агент, подохлаждането се увеличава. Причината за това е по-голямата разлика между температурата на течността и температурата на охлаждащата среда, която резултира в по-висок топлинен поток в тази част на кондензатора. Вследствие на това, специфичната енталпия на входа на изпарителя не се увеличава линейно с повишаване на температурата на кондензация, т.е. редуцирането на q_0 е ограничено.

В процеса на проектиране, изборът на кондензатор при по-висока входяща температурна разлика (ΔT_1) води до директно редуциране на q_0 и увеличаване на w_c , следователно до директно намаляване на ефективността. Също така, за да се постигне зададената хладилна мощност, е необходим компресор с по-голям геометричен обемен дебит. Аналогичен е резултатът от ограничаване на ефективната топлообменна повърхност на кондензатора, вследствие на замърсяване.



Фигура 4. log p-h диаграма, демонстрираща ефекта от повишаване на температурата на кондензация върху параметрите на хладилния цикъл

В следващите две таблици са представени примери за промяната на характеристиките на хладилната система при повишаване на температурата на кондензация, при два различни хладилни агента. Температурата на изпарение, прегревът и подохладането се приемат за постоянни.

Параметър	Означение	Дименсия	Стойност					
Хладилен агент	R134a	[-]	-					
Темп. на изпарение	t_0	[°C]	-10,0					
Прегрев	Δt_{0h}	[K]	10					
Темп. на кондензация	t_c	[°C]	45	46	47	48	49	50
Подохладане	Δt_{cu}	[K]	5					
Хладилна мощност	\dot{Q}_0	[kW]	9,89	9,73	9,56	9,40	9,23	9,07
Електрическа мощност	P	[kW]	4,01	4,04	4,07	4,10	4,13	4,16
Ефективност	EER	[-]	2,47	2,41	2,35	2,29	2,23	2,17
Процентна промяна в ефективността	-	[%]	-	-2,4	-2,5	-2,6	-2,6	2,7

Параметър	Означение	Дименсия	Стойност					
Хладилен агент	R410A	[-]	-					
Темп. на изпарение	t_0	[°C]	-10,0					
Прегрев	Δt_{0h}	[K]	10					
Темп. на кондензация	t_c	[°C]	45	46	47	48	49	50
Подохладане	Δt_{cu}	[K]	5					
Хладилна мощност	\dot{Q}_0	[kW]	12,60	12,40	12,25	12,00	11,80	11,60
Електрическа мощност	P	[kW]	5,59	5,72	5,86	6,01	6,16	6,32
Ефективност	EER	[-]	2,26	2,17	2,09	2,00	1,92	1,84
Процентна промяна в ефективността	-	[%]	-	-4,0	-3,7	-4,3	-4,0	-4,2

Аналогично на ефекта при понижаване на температурата на изпарение, при повишаване на температурата на кондензация с 1 К е налице редуциране на ефективността със средно 3 %.

Важно е да се отбележи, че механизмите, по които промяната на двата основни параметъра води до промяна в характеристиките на хладилната система, са различни. Правилното разбиране на тези механизми е ключово за предприемане на адекватни мерки за ограничаване на негативния ефект върху мощността и ефективността на хладилната система в конкретно приложение.

Заклучението

Изложеният анализ демонстрира, че ефекта от промяната в температурите на изпарение и кондензация върху характеристиките на хладилната система зависи от свойствата на хладилния агент, конфигурацията на системата, конструкцията на компресора и т.н. Въпреки това, инженерната практика показва, че в общия случай, би могло да се приеме следното консервативно правило:

Понижаване на температурата на изпарение или повишаване на температурата на кондензация с 1 К, води до редуциране на ефективността на хладилната машина с приблизително 3 %.

Тази стойност е валидна с достатъчна точност за повечето от използваните в практиката хладилни агенти и конфигурации на хладилни системи. Ето защо, от изключителна важност при проектирането, монтажа и експлоатацията на пароконпресорните хладилни и термодомпени системи, е максимално да се ограничат всички фактори, водещи до увеличаване на разликата между двете температурни нива.

При анализа на различни технически проблеми в следващите издания на рубриката „Хладилни системи“, количествената оценка на ефекта от промяната на работните параметри върху характеристиките на хладилната машина, ще се основава на представеното в настоящия материал инженерно правило.

Автор:

маг. инж. Светослав Влашки

моб. тел: +359/ 87 812 6622

e-mail: svetoslav.vlashki@gmail.com