

ОЦЕНКА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО СОВЕРШЕНСТВА РАБОЧИХ ВЕЩЕСТВ КАСКАДНЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН

Л. И. Морозюк

Доктор технических наук, доцент
Кафедра холодильных машин, установок и
кондиционирования воздуха
Институт холода, криотехнологий и
экоэнергетики им. В. С. Мартыновского
Одесская национальная академия
пищевых технологий
ул. Дворянская, 1/3, г. Одесса, Украина, 62026
E-mail:lara.morozyuk@mail.ru

Каскадні холодильні машини побудовано з поєднаних послідовно одноступеневих циклів-каскадів з різними робочими речовинами та масовими витратами. Наведено спосіб вибору пари робочих речовин для машини з врахуванням температурного режиму роботи. На прикладі речовин R 744, R 717, R 290 за різними сполученнями у каскадах встановлено взаємний вплив термодинамічних параметрів на ступінь термодинамічної досконалості складного циклу

Ключові слова: каскадна холодильна машина, робоча речовина, ступінь термодинамічної досконалості

Каскадные холодильные машины представляют последовательно совмещенные одноступенчатые циклы-каскады с разными рабочими веществами и массовыми расходами. Приведен способ выбора пары рабочих веществ для машины с учетом температурного режима работы. На примере веществ R 744, R 717, R 290 при различных сочетаниях в каскадах установлено взаимное влияние термодинамических параметров на степень термодинамического совершенства сложного цикла

Ключевые слова: каскадная холодильная машина, рабочее вещество, степень термодинамического совершенства

1. Введение

Компрессорные холодильные машины работают в широком интервале температурных режимов в охлаждаемых объектах от $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для поддержания температур выше $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ применяют одноступенчатые парокомпрессорные машины. Для более низких температур – предназначены многоступенчатые машины, работающие на одном рабочем веществе, и каскадные, работающие на двух и более рабочих веществах. Такое распределение температурных режимов и схемных решений определяется объёмными (массогабаритными) и энергетическими характеристиками компрессоров, комплектующих машины [1].

Рабочими веществами в каскадных машинах преимущественно служили R12 и R22 в высокотемпературном верхнем каскаде (ВК) и R13, R14 – в низкотемпературном нижнем каскаде (НК). С точки зрения потребительских характеристик машины (холодопроизводительности и потребляемой мощности) пары веществ удовлетворяли требованиям энергосбережения в холодильной технике.

Однако в связи с Положениями Монреальского Протокола 1987 г. относительно экологической безопасности холодильной техники указанные рабочие вещества запрещены к использованию, что привело к поиску новых пар рабочих веществ для каскадных

машин, отвечающих совместным требованиям энергосбережения и экологической безопасности, для обеспечения температур в объектах от $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Научно-техническая информация о создании нового поколения каскадных холодильных машин и поиске новых рабочих веществ для них содержится в работах последнего десятилетия. Наиболее известной и изученной является машина с парой веществ R717/R744 (аммиак – в ВК, диоксид углерода – в НК). Термодинамический анализ сложного цикла машины установил, что перспективной областью для использования машины являются большие холодопроизводительности при температурах в охлаждаемых объектах от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ [2–5]. Машины выпускают в промышленном масштабе ведущие мировые фирмы [6]. Наряду с R717/R744 в работе [5] рассматривается и возможная замена R717 на R290 (пропан), R1270 (пропилен) и R404A. Использование R744 в качестве рабочего вещества ВК было отклонено, по причине высоких рабочих давлений при реализации цикла в надкритической области.

В противовес этому, в работе [7] представлен термодинамический анализ каскадной машины с веществами

R744/R290, причём R744 предлагается в качестве рабочего вещества ВК с циклом в надкритической области. Авторы работы [7] считают главными преимуществами пары следующее: оба вещества натуральные, имеют нулевые значения ODP и близкие к нулю GWP, обеспечивают температурный уровень от $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. В работе приведены расчётные параметры сложного цикла при решении "энергетической задачи", т. е. определение максимального коэффициента преобразования COP машины в зависимости от промежуточной (граничной) температуры $T_{ки}$ между ВК и НК.

В работе [8] представлен анализ нескольких пар веществ, в которых в качестве рабочего вещества ВК служит R744. В НК предполагается использовать группу HFC-типа, обеспечивающую получение температур ниже температуры тройной точки R744 ($-56,6\text{ }^{\circ}\text{C}$). В группу вошли R125, R41, R32 и R23. Авторы работы [8] показали, что такие пары и соответствующие им сложных циклы создают реальные условия для проектирования каскадных холодильных машин с температурами ниже $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$. В этой же работе приведена информация об экспериментальных исследованиях каскадных машин с азеотропными смесями R170/R23 и R170/R116 в НК с температурами ниже $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Смеси рассмотрены как альтернатива R508. В режимах $T_{ки} = -40...-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $T_{о}^{нк} = -88...-72\text{ }^{\circ}\text{C}$ отмечен рост COP машины, примерно, на 10 %, а для тройной смеси R170/R116/R23 – на 40 % по сравнению с R508.

Интересной, с точки зрения схемно-циклового решения каскадной холодильной машины, является работа [9]. В ней рассмотрено использование R744 одновременно в обеих каскадах. ВК работает по надкритическому циклу, НК – по циклу в области температур ниже тройной точки (trans – triplecycle). Дросселирование в НК осуществляется в двухфазную зону "пар – твёрдое тело" с осаждением сухого льда внутри испарителя. Сухой лёд сублимирует при контакте с электрическими резисторами, а каскадная машина работает непрерывно со стабильным температурным режимом в испарителе ниже $-56,6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В работе [10] представлены результаты экспериментального исследования каскадной машины с R22/R404A. Предполагается, что пара отвечает требованиям "greenhouse", а сама машина отнесена к группе малых холодопроизводительностей (ёмкость охлаждаемого объёма $0,8\text{ м}^3$). Режим работы машины: температура конденсации ВК $T_{к}^{вк} = 30...45\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура кипения НК $T_{о}^{нк} = -50...-25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Результаты исследования представлены зависимостью $\text{COP} = f(T_{ки})$.

Во всех работах подтверждается тот факт, что при фиксированных крайних температурах каскадного цикла ($T_{ср}...T_{хол}$) пары рабочих веществ не равноценны во влиянии на энергетические характеристики машин. Это влияние оценено абсолютным значением коэффициента преобразования COP машины в зависимости от $T_{ки}$. Такой подход к анализу машины, с точки зрения выбора веществ, необходим, но недостаточен. Влияние должно быть оценено относительной величиной – степенью термодинамического совершенства рабочего вещества $\eta_{сте}$.

Степень термодинамического совершенства $\eta_{сте}$ в этом контексте должна рассматриваться как отношение COP действительного цикла к COP цикла, принятого в качестве обратимого образца, осуществляемого в том же интервале температур ($T_{ср}...T_{хол}$).

Определение термодинамического совершенства рабочего вещества является первым этапом энтропийно-циклового метода термодинамического анализа действительных циклов холодильных машин и тепловых насосов [12].

Основанный на известном соотношении Гюи – Стодоль, энтропийно-циклового метод предполагает неизменным массовый расход рабочих веществ во всех процессах исследуемого цикла, что свойственно простым одноступенчатым циклам

В каскадной машине реализуются два простых цикла в интервалах ($T_{ср}...T_{ки}$) и ($T_{ки}...T_{хол}$) с двумя разными рабочими веществами и разными массовыми расходами. Уровень рабочих давлений в НК соответствует обычным одноступенчатым циклам, уровень температур значительно отличается, поэтому обратимый цикл для каскадной машины должен учитывать все особенности рабочих веществ и сохранять тот же полезный эффект, что и в действительном цикле.

Образцом был выбран сложный цикл Карно ВК – Карно НК, поскольку процессы в простых действительных циклах осуществляются в области насыщения с большим приближением к циклу Карно.

Выбор рабочих веществ в холодильных машинах основан на общем методе сравнительной оценки термодинамических параметров, разработанном Р. Планком [1]. Метод – удобное средство для получения простого и однозначного ответа при оценке преимуществ того или иного рабочего вещества в конкретных условиях, но не претендующий на полноту. Он не единственный, но существенный фактор, определяющий практическую целесообразность применения рабочего вещества в машинах различных типов и назначения, поиска и внедрения новых рабочих веществ.

Применимость энтропийно-циклового метода для анализа сложных многоступенчатых циклов с единым рабочим веществом, но с переменным расходом в элементах доказана в работе [13]. Для каскадных циклов, широко используемых в практике проектирования и эксплуатации общепромышленных энергопреобразующих систем, и, в первую очередь, холодильных и теплонасосных, метод не применялся ввиду того, что в машине используются пары веществ с разными расходами в отдельных к каскадах

Термодинамический анализ физических свойств пар рабочих веществ для каскадных холодильных машин намечает выбор их с позиций энергосбережения.

3. Цель и задачи исследования

Целью работы является развитие энтропийно-циклового метода термодинамического анализа процессов в каскадных холодильных машинах с целью энергосбережения путем формирования комплекса «цикл-рабочие вещества».

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать способ системного анализа для осуществления синтеза схемно-циклового решения каскадной машины;
- разработать способ построения соответственных циклов Карно для каждого каскада между крайними для каскада температурами;

– показать на частном примере использование энтропийно-циклового метода для оценки термодинамического совершенства пары рабочих веществ.

4. Теоретические основы выбора рабочих веществ каскадной машины

Основой для решения задачи послужили выводы, сделанные автором совместно с проф. Никульшиным Р. К. при анализе циклов двухступенчатых холодильных машин в работе [13]. Согласно выводам следует, что для группы последовательно совмещенных циклов совокупный эффект эквивалентен эффекту цикла между теми же крайними температурами. На основании сказанного, до проведения каких-либо термодинамических оценок по каскадному циклу, необходимо провести по каскадам сведение массовых расходов к единице массового расхода вещества каскада, принятого за базовый. Для холодильных машин – это нижний каскад НК. Таким образом, предлагается:

- выбрать принципиальную схему машины;
- построить соответствующий ей цикл с учётом выбранных рабочих веществ;
- определить по циклу все необходимые термические и калорические параметры в узловых точках;
- определить массовый расход рабочего вещества в НК для заданной холодопроизводительности;
- составить энергетический баланс конденсатора-испарителя, из которого определить массовый расход рабочего вещества в ВК;
- свести всё к 1кг рабочего вещества НК;
- построить соответственные циклы Карно для каждого каскада между крайними для них температурами;
- изменить соответственный цикл Карно ВК с учётом расхода, что приведёт к его увеличению либо уменьшению.

Полученный цикл Карно ВК будет таким, который в совокупности с Карно НК даёт тот же эффект, что единый цикл между крайними температурами $T_{cp} \dots T_{хол}$.

Для первой апробации метода действительный цикл каскадной машины формируем из двух циклов Планка [1]. В этом случае состояния рабочих веществ на всасывании в компрессоры и перед дросселированием однозначно определены.

На рис. 1 приведена принципиальная схема машины. При наличии одного и того же рабочего вещества в обоих каскадах и отсутствии разности температур в конденсаторе-испарителе цикл является простейшим.

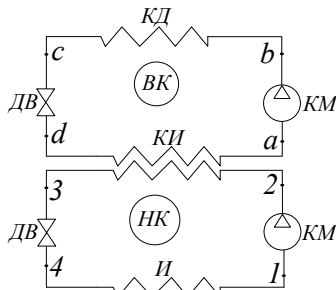


Рис. 1. Принципиальная схема каскадной машины: КМ – компрессор; КД – конденсатор; И – испаритель; КИ – конденсатор-испаритель; ДВ – дроссель; НК – нижний каскад; ВК – верхний каскад

В диаграмме состояний T-s (рис. 2) действительный цикл представлен двумя контурами 1-2-3-4 и a-b-c-d, а соответственные циклы Карно ВК и НК контурами $m_1-m_2-m_3-m_4$ и $n_1-n_2-n_3-n_4$.

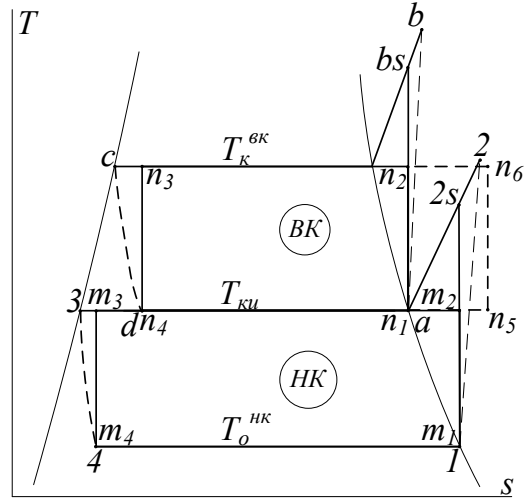


Рис. 2. Цикл машины с единым веществом в каскадах при $\Delta T_{ки} = 0$: Где T_k^{BK} – температура конденсации в ВК; T_o^{HK} – температура кипения в НК, $T_{ки}$ – температура в конденсаторе-испарителе

Для конкретных рабочих веществ и температурных режимов удельные характеристики цикла определяют как

- удельная массовая холодопроизводительность НК

$$q_o^{HK} = h_1 - h_4 = h_{m1} - h_{m4}, \text{ (кДж/кг)}, \quad (1)$$

где h – удельная энтальпия рабочего вещества в соответствующих точках цикла, кДж/кг;

- работа компрессоров НК и ВК при обратимом адиабатном сжатии

$$w_{ks}^{HK} = h_{2s} - h, \text{ (кДж/кг)}, \quad (2)$$

$$w_{ks}^{BK} = h_{bs} - h_a, \text{ (кДж/кг)}, \quad (3)$$

- действительная работа сжатия компрессоров НК и ВК с учётом индикаторных КПД соответствующих компрессоров

$$w_k^{HK} = w_{ss}^{HK} / \eta_i, \text{ (кДж/кг)}, \quad (4)$$

$$w_k^{BK} = w_{ss}^{BK} / \eta_i, \text{ (кДж/кг)}, \quad (5)$$

где η_i – индикаторный коэффициент полезного действия компрессора;

- удельная тепловая нагрузка на конденсатор НК

$$q_k^{HK} = q_o^{HK} + w_k^{HK}, \text{ (кДж/кг)}, \quad (6)$$

- удельная массовая холодопроизводительность ВК

$$q_o^{BK} = h_a - h_d, \text{ (кДж/кг)}, \quad (7)$$

– массовый расход рабочего вещества ВК, отнесённый к 1кг рабочего вещества НК (в соответствии с энергетическим балансом конденсатора – испарителя $Q_o^{BK} = Q_k^{HK}$ или $M^{BK}q_o^{BK} = M^{HK}q_k^{HK}$)

$$a = q_k^{HK} / q_o^{BK} \tag{8}$$

Для условий примера: $q_k^{HK} > q_o^{BK}$ и $a > 1$.

Коэффициент преобразования COP действительного цикла

$$COP_d = q_o^{HK} / (w_k^{HK} + aw_k^{BK})^{-1} \tag{9}$$

Работа цикла Карно НК

$$w_{и}^{HK} = (h_{m2} - h_{m1}) - (h_{m3} - h_{m4}), \tag{10}$$

и соответственно ВК

$$w_{и}^{BK} = (h_{n2} - h_{n1}) - (h_{n3} - h_{n4}), \tag{11}$$

Коэффициент преобразования каскадной машины, работающей по циклу Карно ВК – Карно НК, определяется выражением

$$COP_k = q_o^{HK} / (w_{и}^{HK} + aw_{и}^{BK})^{-1} \tag{12}$$

Степень термодинамического совершенства составит

$$\eta_{etc} = COP_d / COP_k = (w_{и}^{HK} + a \cdot w_{и}^{BK}) / (w_k^{HK} + aw_k^{BK})^{-1} \tag{13}$$

Из уравнения (12) следует, что соответственный цикл Карно ВК расширяется по оси s вправо, до размеров $n_5 - n_6 - n_3 - n_4$ (рис. 2).

Сопоставление рабочих процессов и степени термодинамического совершенства циклов двухступенчатой холодильной машины с полным промежуточным охлаждением и ступенчатым дросселированием, рассмотренного в работе [4], и каскадной (рис. 2) с одним рабочим веществом в каскадах и отсутствием разности температур в процессе теплообмена в конденсаторе-испарителе, приводит к выводу об их термодинамической эквивалентности и подтверждает применимость метода для анализа сложного каскадного цикла.

В действительных условиях работы в конденсаторе-испарителе каскадной машины существует разность температур между потоками НК и ВК (рис. 3). При наличии $\Delta T_{ки}$ и сохранении режима НК (контур 1-2-3-4) цикл ВК характеризуется контуром $a'-b'-c'-d'$. В результате величина aw_k^{BK} возрастает и COP_d уменьшается. Очевидно, что при едином рабочем веществе в каскадах машина термодинамически менее эффективна относительно двухступенчатой.

Основным достоинством каскадной машины является возможность использования разных рабочих веществ в каскадах. Поиск рабочих веществ для каскадов, как правило, выполнялся в соответствии с общими требованиями к рабочим веществам для холодильных машин [2].

Усложним задачу путём введения в циклы ВК и НК разные рабочие вещества. Условно цикл каскадной машины представлен на рис. 4.

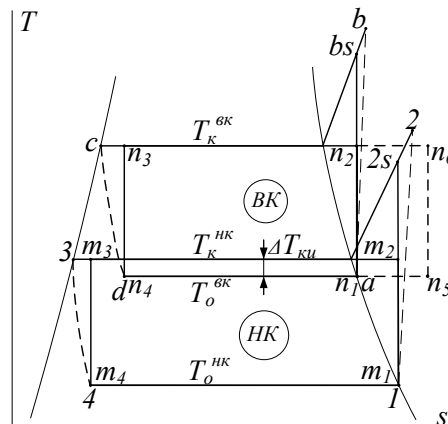


Рис. 3. Цикл машины с единым рабочим веществом в каскадах при $\Delta T_{ки} \neq 0$ T_o^{BK} – температура кипения в ВК; T_k^{HK} – температура конденсации в НК

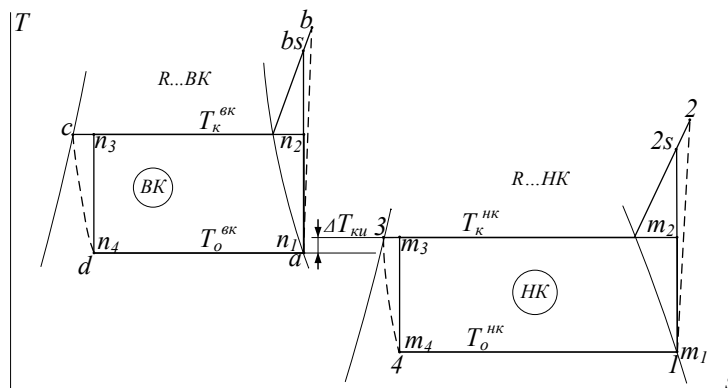


Рис. 4. Цикл машины с разными рабочими веществами в каскадах при $\Delta T_{ки} \neq 0$

При наличии рабочих веществ с различными термодинамическими свойствами в соответствии с уравнением (8) соотношение массовых расходов в каскадах может быть: $a > 1$ при $q_k^{HK} > q_o^{BK}$; $a = 1$ при $q_k^{HK} = q_o^{BK}$; $a < 1$ при $q_k^{HK} < q_o^{BK}$.

В первом случае габарит соответственного цикла Карно ВК следует увеличить, во втором – цикл остаётся в прежних границах, в третьем – габарит уменьшают. Все варианты реальные и зависит лишь от физических свойств рабочих веществ.

Суммарная затрачиваемая работа в цикле каскадной машины определяется температурным режимом работы конденсатора-испарителя (граничной температурой между каскадами $T_{ки}$). Эта температура может изменяться от T_o^{HK} до T_k^{BK} с соответствующим изменением работы. Если $T_{ки}$ равна одной из крайних температур T_o^{HK} или T_k^{BK} , то каскадная машина, по существу, превращается в одноступенчатую с одним из рабочих веществ в каскадах. Вследствие этого существует такая $T_{ки}$, при которой значение η_{etc} цикла машины ока-

зывается максимальной для данной пары веществ.

Отыскание $\eta_{стс}$ для различных пар веществ и сопоставление этих значений при фиксированном полезном эффекте $Q_o^{нк}$ в заданном температурном режиме является основой выбора рабочих веществ для каскадных холодильных машин при решении «энергетической задачи».

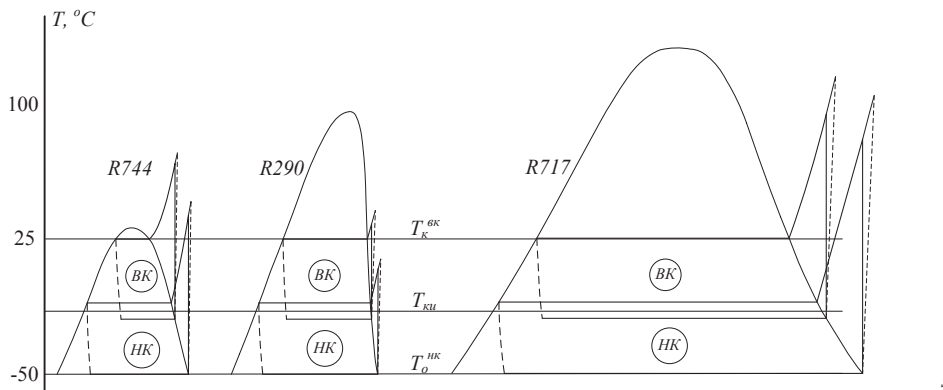


Рис. 5. Сравнительный анализ свойств рабочих веществ в диаграмме T – s

5. Пример проведения оценки степени термодинамического совершенства каскадной машины

В качестве примера проведем оценку степени термодинамического совершенства $\eta_{стс}$ каскадной холодильной машины для пар, составленных из трех рабочих веществ R744, R290, R717 в едином диапазоне крайних температур $T_o^{нк} = -50\text{ }^\circ\text{C}$ при индикаторном КПД компрессоров $\eta_i = 0,75$. Выбор веществ осуществлен на основании анализа имеющейся информации в первом разделе статьи. Термодинамические и теплофизические свойства, влияющие на результаты анализа, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Термодинамические параметры рабочих веществ

Рабочее вещество	Диоксид Углерода R744	Пропан R290	Аммиак R717
Термодинамические параметры	R744	R290	R717
Критическая температура, $T_{кр}$, $^\circ\text{C}$	31,0	96,8	132,4
Критическое давление, $p_{кр}$, бар	75,2	43,4	115,2
Нормальная температура кипения, $T_{сн}$, $^\circ\text{C}$	-78,5	-42,2	-33,4
Температура затвердевания, T_f , $^\circ\text{C}$	-56,6	-187,1	-77,7
Теплота парообразования, г, кДж/(кг·К) при $-50\text{ }^\circ\text{C}/-15\text{ }^\circ\text{C}$	335,2/ 271,6	438,0/ 383,0	1416,8/ 1312,6
Средняя теплоемкость насыщенной жидкости в интервале температур $-50\text{ }^\circ\text{C} \dots 25\text{ }^\circ\text{C}$, кДж/(кг·К)	2,03	2,45	4,6
Средняя теплоемкость сухого насыщенного пара в интервале температур $-50\text{ }^\circ\text{C} \dots 25\text{ }^\circ\text{C}$, кДж/(кг·К)	1,2	1,12	2,6
Показатель адиабаты, k	1,3	1,13	1,3

Температурный режим соответствует реальным каскадным машинам, разность температур на теплопередачу в конденсаторе-испарителе $\Delta T_{ки} = 5$ град. На рис. 5 в диаграмме T – s в едином масштабе представлены циклы трех каскадных машин с одинаковыми рабочими веществами в каскадах.

Особенности циклов следующие:

- цикл с R744 осуществляется в интервале температур вблизи критической ($T_{кр}$) и тройной (T_f) точек;
- малая теплоемкость насыщенного пара R290 определяет малые перегревы пара в процессах сжатия.

Расчеты параметров и характеристик циклов выполнены в соответствии с уравнениями (1)–(13). Результаты расчетов приведены на рис. 6.

Высшая степень термодинамического совершенства $\eta_{стс}$ отмечается для R290 $\eta_{стс} = 0,4 \dots 0,5$. Два остальные рабочие вещества имеют, примерно, равные значения в пределах $\eta_{стс} = 0,15 \dots 0,20$. Однако этим значениям соответствуют разные промежуточные температуры $T_{ки}$ (режимы работы конденсатора-испарителя). Для всех машин соотношение массовых расходов больше единицы и соответственно равны $a = 1,5$ (R290), $a = 1,4$ (R717), $a = 2,0$ (R744).

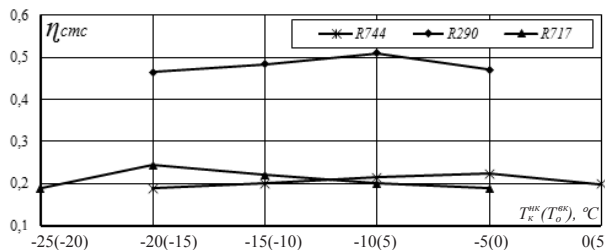


Рис. 6. Степень термодинамического совершенства $\eta_{стс}$ циклов каскадных машин с одинаковыми рабочими веществами в каскадах.

Используя данные предыдущего примера, сформируем новые циклы следующим образом: R717BK/R744HK, R744BK/R717HK, R744BK/R290HK, R290BK/R744HK. Результаты расчетов представлены на рис. 7.

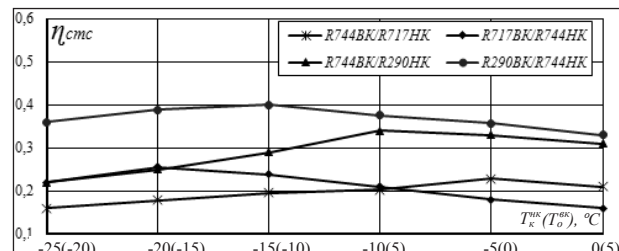


Рис. 7. Степень термодинамического совершенства $\eta_{стс}$ циклов каскадных машин с разными рабочими веществами в каскадах

Наивысшей степенью термодинамического совершенства обладает пара R290BK/R744HK, следующей стоит R744BK/R290HK со значениями на 25 % меньшими. На величину $\eta_{\text{ст}}$ оказывают влияние положительные свойства R290 как рабочего вещества холодильных машин.

Другая пара, независимо от нахождения веществ в каскадах имеет, примерно, равную $\eta_{\text{ст}}$, но при разных режимах работы конденсатора-испарителя. Отношение массовых расходов распределилось следующим образом: R717BK/R744HK– $a=0,3$, R744BK/R717HK– $a=9,2$, R744BK/R290HK– $a=2,7$, R290BK/R744HK– $a=1,15$. Основанные на величинах теплоты парообразования, которые приведены в табл. 1, соответствующие изменения получили габариты циклов Карно BK.

7. Выводы

Разработан способ формирования комплекса «цикл–рабочее вещество», который базируется на оценке сте-

пени термодинамического совершенства пары рабочих веществ, что позволяет осуществлять синтез схемно-цикловых решений каскадных холодильных машин, отвечающих задачам энергосбережения.

Разработан способ построения соответственных циклов Карно с учетом массовых расходов рабочих веществ в каскадах, что дало возможность использовать энтропийно-цикловую метод для термодинамической оценки каскадной машины.

Автором доказана применимость способа выбора пары рабочих веществ для каскадной машины, основанного на энтропийно-цикловом методе термодинамического анализа, что дало возможность учитывать конкретное взаимное влияние свойств рабочих веществ в каскадах на совершенство машины и достаточно точно определять оптимальные режимы работы конденсатора-испарителя.

Таким образом, на стадии предварительного проектирования, не прибегая к сложным вариантным расчетам, обеспечивается рациональный выбор пары рабочих веществ для каскадной машины, соответствующий решению «энергетической задачи».

Литература

1. Морозюк, Т. В. Теория холодильных машин и тепловых насосов [Текст] / Т. В. Морозюк. – Одесса: Студия «Негоциант», 2006. – 712 с.
2. Dopazo, A. Experimental Evaluation of a Cascade Refrigeration System Prototype with CO₂ and NH₃ for Freezing Process Application [Text] / A. Dopazo, J. Fernandez-Seara // International Journal of Refrigeration. – 2011. – Vol. 34, Issue 1. – P. 257–267. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2010.07.010
3. Bingming, W. Experimental Investigation on the Performance of NH₃/CO₂ Cascade Refrigeration System with Twin-Screw Compressor [Text] / W. Bingming, W. Huagen, L. Jianfeng, X. Ziwen // International Journal of Refrigeration. – 2009. – Vol. 32, Issue 6. – P. 1358–1365. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2009.03.008
4. Lee, T. Thermodynamic analysis of optimal condensing temperature of cascade-condenser in CO₂/NH₃ cascade refrigeration systems [Text] / T. Lee, C. Liu, T. Chen // International Journal of Refrigeration. – 2006. – Vol. 29, Issue 7. – P. 1100–1108. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2006.03.003
5. Sachdeva, G. Performance Study of Cascade Refrigeration System Using Alternative Refrigerants [Text] / G. Sachdeva, V. Jain, S. S. Kachhwaha // International Scholarly and Scientific Research & Innovation. – 2014. – Vol. 8, Issue 3.
6. Bitzer Kuhlmaschinenbau GmbH. [Электронный ресурс] / Обзор хладагентов. – 2004 – № 13. А-501-13. – С. 36. – Режим доступа: <http://yakalod.com.ua/file/Обзор%20хладагентов%20и%20их%20взаимозаменяемость.pdf>
7. Bhattacharyya, S. Optimization of a CO₂-C₃H₈ Cascade System for Refrigeration and Heating [Text] / S. Bhattacharyya, A. Kumar, R. K. Khurana, J. Sarkat // International Journal of Refrigeration. – 2005. – Vol. 28, Issue 8. – P. 1284–1292. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2005.08.010
8. Di Nicola, G. Blends of Carbon Dioxide and HFCs as Working Fluids for the Low-Temperature Circuit in Cascade Refrigerating Systems [Text] / G. Di Nicola, G. Giuliana, F. Polonara, R. Stryjekb // International Journal of Refrigeration. – 2005. – Vol. 28, Issue 2. – P. 130–140. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2004.06.014
9. Yamaguchi, H. Investigation of Dry Ice Blockage in an Ultra-Low Temperature Cascade Refrigeration System Using CO₂ as a Working Fluid [Text] / H. Yamaguchi, X.-D. Niu, K. Sekimoto, P. Neksa // International Journal of Refrigeration. – 2011. – Vol. 34, Issue 2. – P. 466–475. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2010.11.001
10. Fiorit, J. J. Theoretic-experimental evaluation of a cascade refrigeration system for low temperature applications using the pair r22/r404 [Text] / J. J. Fiorit, C. U. S. Lima, V. S. Junior // Engenharia Termica (Thermal Engineering). – 2012. – Vol. 11, Issue 1. – P. 07–14.
11. Мартыновский, В. С. Анализ действительных термодинамических циклов [Текст] / В. С. Мартыновский. – М.: Энергия, 1972. – 216 с
12. Morosuk, T. Entropy-cycle method for analysis of refrigeration machine and heat pump cycles [Text] / T. Morosuk, R. Nikulshin, L. Morosuk // Thermal science. – 2006. – Vol. 10, Issue 1. – P. 111–124. doi: 10.2298/tsci0601111m
13. Никкульшин, Р. К. Энтропийный метод моделирования и анализа двухступенчатых циклов холодильных машин и тепловых насосов [Текст] / Л. И. Морозюк // Сборник научных трудов 8-ой Международной научно-технической конференции «Устойчивое развитие и искусственный холод». – 2012. – Т. 1.8–16.