

Л. В. Галимова, А. А. Камнев, О. О. Лазаренко, К. Гуиди Тоньон

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОДНОСТУПЕНЧАТОЙ АММИАЧНОЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ

Одним из направлений решения проблем энергосбережения является анализ работы технических систем, потребляющих и преобразующих энергию.

Эксергетический анализ любого исследуемого объекта дает после соответствующей обработки информацию не поверхностную, а показывающую скрытые в энергетическом балансе характеристики, необходимые для исследования и совершенствования объекта.

Задача эксергетического анализа – оценка степени термодинамического совершенства технической системы в целом, а также выявление тех стадий технического процесса, на которых сосредоточены основные потери эксергии (потенциальной работоспособности системы).

Оценка энергоэффективности агрегатов проектируемой, эксплуатируемой и модернизируемой холодильной установки осуществляется на основе определения обобщенного показателя энергетической эффективности (эксергетического КПД), значение которого показывает степень приближения установки к идеальной [1].

По существующим оценкам, при выборе процесса определяются 40 % потерь, при проектировании – еще 40 %, и, таким образом, примерно на 80 % потерь на этапе производства воздействовать уже невозможно. Поэтому эксергетический анализ имеет особенно большое значение на стадиях эскизной проработки и проектирования. Для стадии эксплуатации часто достаточны качественные эксергетические соображения [2].

В дальнейшем эксергетический анализ проводится для существующей экспериментальной холодильной машины.

При рассмотрении возможностей уменьшения потерь будут обсуждаться и результаты, которые можно получить путем изменения основного процесса или принципа действия системы.

Целью исследований являлся анализ цикла аммиачной экспериментальной холодильной машины в рабочих режимах.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- сняты параметры действующей холодильной машины;
- разработана объединенная методика теплового расчета, определения эксергетических потерь в элементах холодильной машины и в соответствии с ней произведены расчеты;
- разработаны блок-схема и программный код теплового расчета, определения эксергетических потерь в элементах машины и цикле в целом;
- проведен численный эксперимент и установлена адекватность программного кода;
- построены диаграммы потоков и потерь эксергии по элементам схемы [3];
- построены зависимости эксергетических потерь в элементах схемы от рабочих параметров;
- проанализированы полученные зависимости и даны качественные эксергетические соображения.

Методы исследования

Схема исследуемой экспериментальной холодильной установки представлена на рис. 1.

Лабораторная установка предназначена для обеспечения холодом систем непосредственного и рассольного охлаждения, обслуживающих ряд потребителей (охлаждаемая камера, льдогенератор, батарея рассольного охлаждения). Для общности выводов приведен анализ цикла холодильной машины.

Рабочими параметрами являются: давление конденсации, давление кипения, температура конца сжатия, температура перегрева холодильного агента, температура охлаждающей воды на входе и выходе из конденсатора, ее расход, температура окружающей среды.

Для теплового расчета по методике использовались параметры характерных точек цикла, взятые из программы CoolPack. Расчет проведен в диаграмме $lgp-h$.

Определение массового расхода холодильного агента вели по тепловому балансу конденсатора.

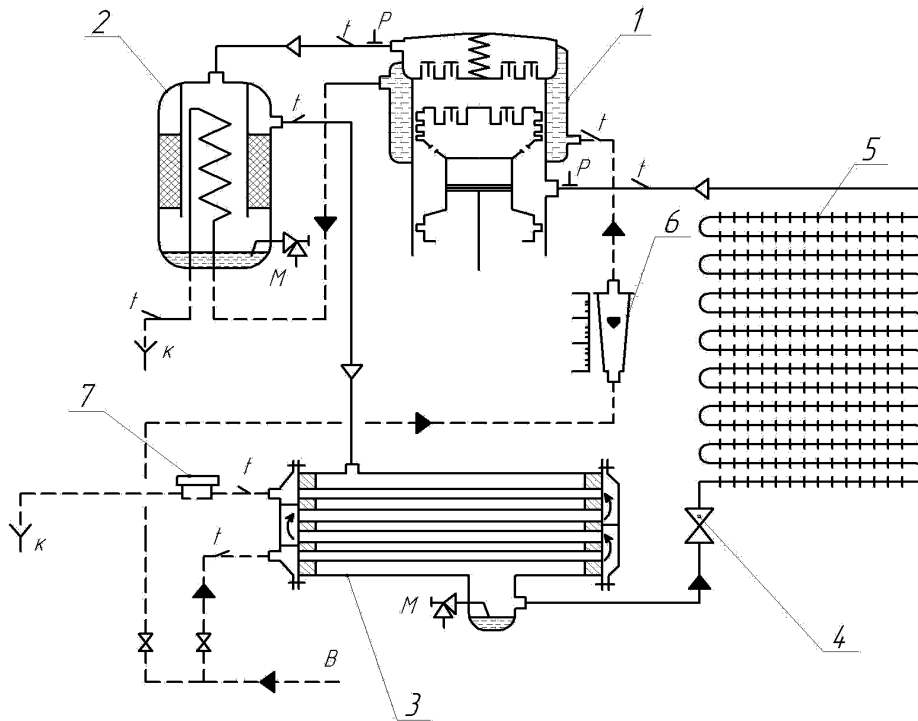


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – компрессор; 2 – отделитель масла; 3 – конденсатор; 4 – регулирующий вентиль; 5 – испаритель; 6 – ротаметр; 7 – счётчик. В – подача воды; К – слив воды; М – выпуск масла из аппарата.

Линия трактов: — хладагента; - - - - - воды.

Состояние потока: —▷ пар; —▶ жидкость.

Измерение параметра: —▷ температуры; —⊥ давления

На рис. 2 представлены методика, результаты теплового расчета, определения эксергетических потерь и КПД элементов и цикла холодильной машины в целом на примере одного из режимов с использованием программы Mathcad.

$$\begin{aligned}
 p_k &:= 0.83 \text{ МПа} & t_{нар} &:= 18 \\
 p_0 &:= 0.23 \text{ МПа} \\
 t_2 &:= 96 \text{ }^\circ\text{C} \\
 t_{не} &:= 8.4 \\
 t_{в1} &:= 16.5 & t_{лб} &:= 18 \text{ }^\circ\text{C} \\
 t_{в2} &:= 18 & L_{кон} &:= 2 \text{ м} \\
 G_v &:= \frac{2.4}{3.6} \text{ } \frac{\text{кг}}{\text{с}} & D_{окон} &:= 0.6 \\
 G_v &:= 0.667 & \alpha_{лб} &:= 0.01 \\
 t_0 &:= -15.5 & S_1(t_0, t_{не}) &:= 6.048 \\
 t_k &:= 19 & S_2(t_k, t_2) &:= 5.998 \\
 h_1(t_0, t_{не}) &:= 1500 & S_3(t_k) &:= 1.228 \\
 h_2(t_k, t_2) &:= 1679.5
 \end{aligned}$$

Рис. 2. Методика, результаты теплового расчета, определения эксергетических потерь и КПД элементов и цикла холодильной машины в целом на примере одного из режимов с использованием программы Mathcad

$$\begin{aligned}
 & h_{11}(t_0) := 1441.4 & S_4(t_0, t_k) &:= 1.259 \\
 & h_3(t_k) := 264.4 & h_4(x) &:= h_3(x) \\
 & l := h_2(t_k, t_2) - h_1(t_0, t_{ne}) & Q_{кон} &:= G \cdot 4.18 \cdot (t_2 - t_1) \\
 & l = 179.5 & Q_{кон} &= 4.18 \\
 & q_k := h_2(t_k, t_2) - h_3(t_k) & \Delta Q_{кон} &:= -\alpha_{лб} \cdot 3.14 \cdot D_{кон} \cdot L_{кон} \cdot (t_k - t_{лб}) \\
 & q_k = 1.415 \times 10^3 & \Delta Q_{кон} &= -0.038 \\
 & Q_k := Q_{кон} + \Delta Q_{кон} & Q_k &= 4.142 \\
 & G := \frac{Q_k}{q_k} & G &= 2.927 \times 10^{-3} \\
 & N := G \cdot (h_2(t_k, t_2) - h_1(t_0, t_{ne})) & N &= 0.525 \\
 & q_0 := h_{11}(t_0) - h_3(t_k) & q_0 &= 1.177 \times 10^3 \\
 & Q_0 := G \cdot q_0 & Q_0 &= 3.445 \\
 & e := \frac{Q_0}{N} & Q_{k1} &:= Q_0 + N & Q_{k1} &= 3.971 \\
 & e = 6.557 & \eta_{dk} &:= 0.9 \\
 & D := \frac{|Q_k - Q_{k1}| \cdot 100}{Q_k} & D &= 4.141 & \eta_k &:= 0.83 \\
 & & & & t_k &= 19 \\
 & E_n := \frac{N}{n_k \cdot \eta_{dk}} & E_n &= 0.703 & T_0 &:= 273 + t_{нар} & T_0 &= 291 \\
 & \Delta e_{21} := (h_2(t_k, t_2) - h_1(t_0, t_{ne})) - T_0 \cdot (S_2(t_k, t_2) - S_1(t_0, t_{ne})) & \Delta e_{21} &= 194.05 \\
 & dk := -\Delta e_{21} + (h_2(t_k, t_2) - h_1(t_0, t_{ne})) \cdot \frac{1}{\eta_k \cdot \eta_{dk}} & dk &= 46.245 \\
 & \Delta e_{23} := h_2(t_k, t_2) - h_3(t_k) - T_0 \cdot (S_2(t_k, t_2) - S_3(t_k)) & \Delta e_{23} &= 27.03 \\
 & \Delta e_{34} := h_3(t_k) - h_3(t_k) - T_0 \cdot (S_3(t_k) - S_4(t_0, t_k)) & \Delta e_{34} &= 9.021 \\
 & \Delta e_{41} := h_3(t_k) - h_1(t_0, t_{ne}) - T_0 \cdot (S_4(t_0, t_k) - S_1(t_0, t_{ne})) & \Delta e_{41} &= 157.999 \\
 & d_{дв} := 0.1 \cdot \left[(h_2(t_k, t_2) - h_1(t_0, t_{ne})) \cdot \frac{1}{\eta_k \cdot \eta_{dk}} \right] & d_{дв} &= 24.029 \\
 & \text{Проверка} \\
 & e_{общ} := dk + \Delta e_{23} + \Delta e_{34} + \Delta e_{41} & e_{общ} &= 240.295 \\
 & D_k := dk \cdot \frac{G}{E_n} & D_k &= 0.192 & D_{кон} &:= \frac{\Delta e_{23} \cdot G}{E_n} & D_{кон} &= 0.112 \\
 & D_{рв} := \frac{\Delta e_{34} \cdot G}{E_n} & D_{рв} &= 0.038 & E_q &:= \frac{\Delta e_{41} \cdot G}{E_n} & E_q &= 0.658 \\
 & \eta_{ек} := \frac{100 - D_k}{90} & \eta_{ек} &= 0.897 & \eta_{ерв} &:= \frac{(1 - D_k - D_{кон} - D_{рв}) \cdot 100}{100 - D_k - 100 - 11.2} \\
 & \eta_{еисп} := \frac{E_q - 0.05}{E_q} & \eta_{еисп} &= 0.924 & \eta_{ерв} &= 0.945
 \end{aligned}$$

Рис. 2. Окончание

При проведении расчетов было установлено, что в одном из режимов нарушено эксергетическое неравенство. Причиной является низкая температура воды, охлаждающей компрессор, и создание за счет этого опасного режима работы компрессора, связанного с возможной конденсацией пара на холодной поверхности цилиндра. В дальнейшем из анализа этот режим исключен. Результаты расчетов используются для установления адекватности программного кода.

На рис. 3 приведена блок-схема программы, которая построена на основе приведенной методики с использованием зависимостей необходимых термодинамических параметров, полученных при помощи программ CoolPack, Mathcad.

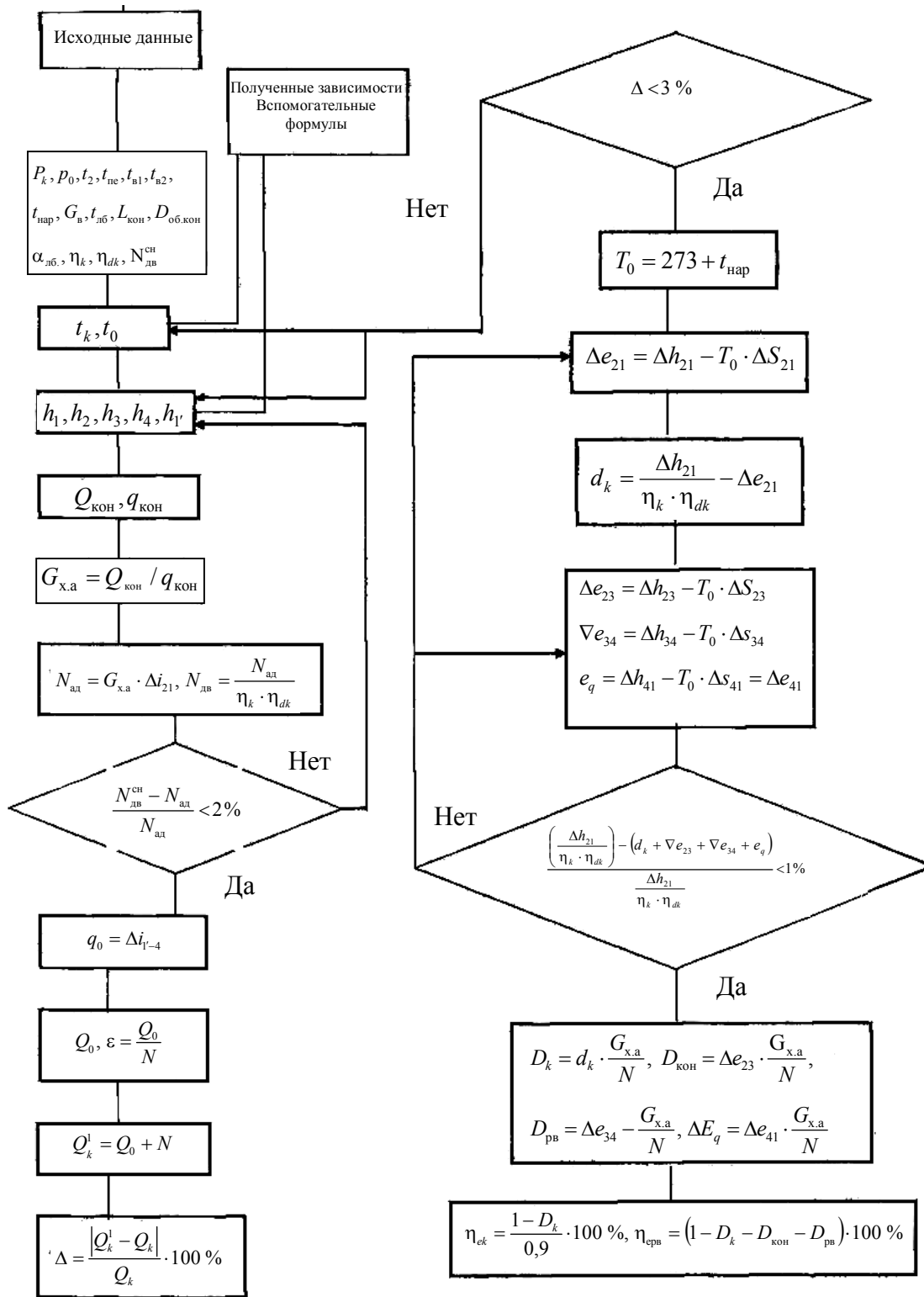


Рис. 3. Блок-схема программы

В соответствии с блок-схемой разработана программа на языке Visual Basic и проведен численный эксперимент для тех же рабочих режимов.

Результаты численного эксперимента для одного из режимов представлены в виде интерфейса программы на рис. 4.

Исходные данные		Результаты расчета					
Pк, МПа	0,75	tk, C	15,5655	N, кВт	0,87323	dk, кДж/кг	108,248
P0, МПа	0,203	t0, C	-11,6523	q0, кДж/кг	1197,62	e23, кДж/кг	31,3039
t2, C	100	h11, кДж/кг	1445,09	Q0, кВт	4,93511	s4, кДж/кг	1,18727
tnар, C	17	h21, кДж/кг	1474,96	eps	5,65149	e34, кДж/кг	2,84048
tnе, C	5,63	h1, кДж/кг	1487,31	Qk1, кВт	5,80835	eq, кДж/кг	141,293
tw1, C	13	h2, кДж/кг	1699,23	D	2,90830	пров1, кДж	283,686
tw2, C	14,83	h31, кДж/кг	248,823	En, кВт	1,16899	прове, кДж	283,686
Gw, м3/с	0,775	h3, кДж/кг	247,468	s1, кДж/кг	5,94984	Dk, %	38,1577
nk	0,83	l, кДж/кг	211,913	s2, кДж/кг	6,07561	Dkond, %	11,0347
ndk	0,9	qk, кДж/кг	1451,76	s3, кДж/кг	1,17748	Drv, %	1,00127
Lконм	2	G, м3/с	4,12073	T0, K	290	Eq, %	49,8062
DDконм	0,6	Qk, кВт	5,98233	e21, кДж/кг	175,437		

Рис. 4. Интерфейс программы

Определение адекватности разработанной программы было проведено путем сравнения результатов численного эксперимента и расчетов по методике.

Графически результаты сравнения представлены на рис. 5 в виде зависимости эксергетической холодопроизводительности от температуры окружающей среды.

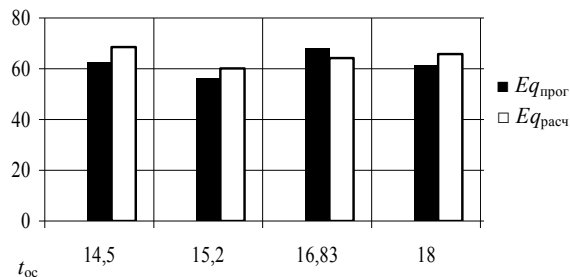


Рис. 5. Результаты сравнения значений эксергетической холодопроизводительности, полученных в результате численного эксперимента и расчетов по методике

Отклонение сравниваемых величин находится в пределах (4,3...6,7) %, что говорит о достаточной точности разработанной программы.

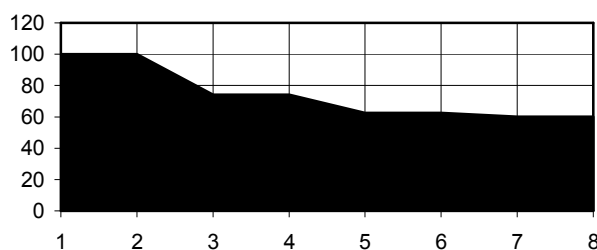
Результаты исследования и их обсуждение

На основе результатов численного эксперимента построены диаграммы потоков и потерь эксергии для четырех режимов работы холодильной машины.

Диаграммы потоков и потерь эксергии позволяют судить о степени участия каждого элемента холодильной машины в потере вводимой эксергии (мощности электродвигателя).

При анализе диаграмм потоков и потерь эксергии (рис. 6) было установлено, что в одном из опытов ($t_0 = -18,9$, $t_{oc} = 14,5$) значения потерь эксергии в компрессоре минимальны вследствие приближения процесса сжатия к адиабатическому. В связи с этим полученное значение потерь, равное 25 %, может быть рекомендовано как минимально возможное для данного типа компрессоров.

E1



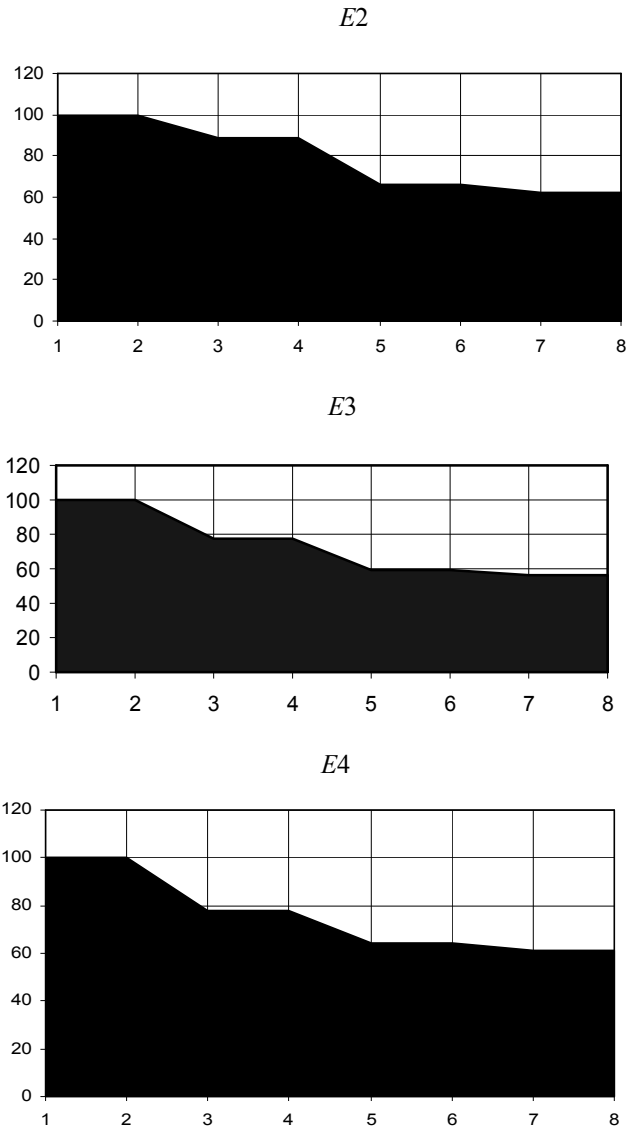


Рис. 6. Диаграммы потоков потерь эксергии для четырех режимов

Характер зависимости на рис. 7 соответствует данным, приведенным в [1] для АК-2АВ-20/10. Отклонение сравниваемых величин находится в пределах 10 %.

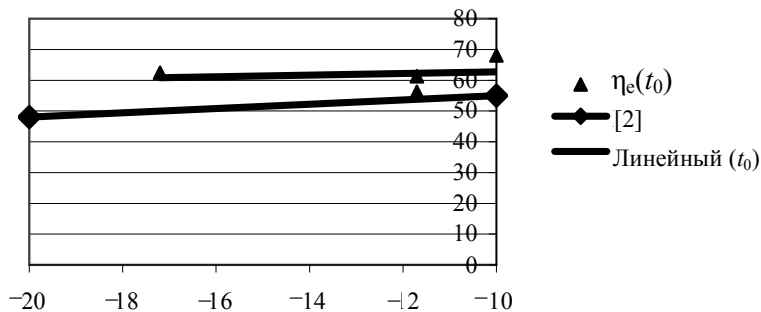


Рис. 7. Зависимость эксергетического КПД цикла от температуры кипения

Анализ зависимости на рис. 8 показал, что рекомендованные значения потерь в конденсаторе наблюдаются при очень малой разности температур воды на входе и выходе из конденсатора. Таким образом, действительные потери в конденсаторе не соответствуют рекомендован-

ному температурному напору по воде при ее однократном использовании. Если предположить, что характер зависимости не меняется, то при рекомендованных значениях разности температур потери в компрессоре составят от 40 до 50 %. Причиной расхождения в величинах потерь является наличие дополнительного термического сопротивления на теплообменной поверхности.

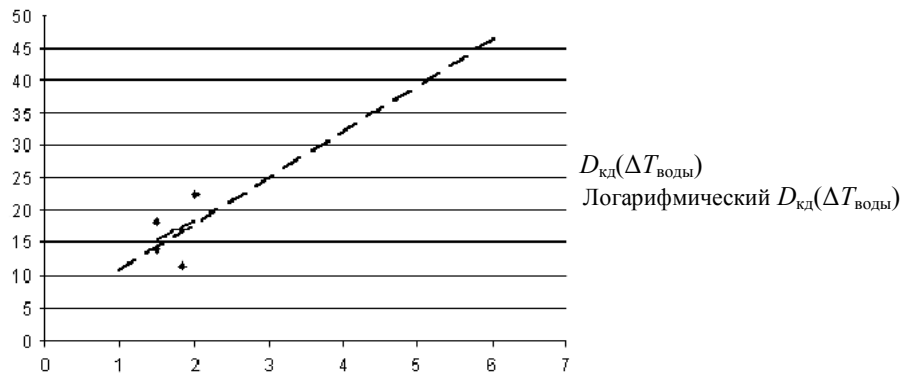


Рис. 8. Зависимость потерь в конденсаторе от температурного напора охлаждающей воды

В подтверждение данного предположения была получена зависимость изменения конденсационного температурного напора от действительных потерь (рис. 9). Как видно из графика, при рекомендованном интервале значений конденсационного температурного напора потери в конденсаторе будут в пределах 30 %.

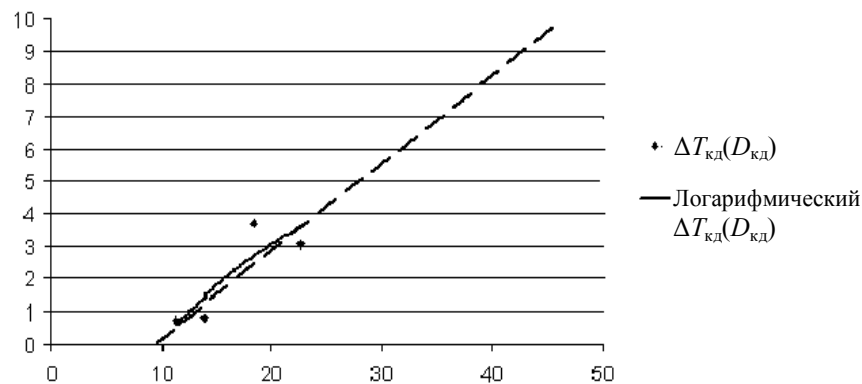


Рис. 9. Зависимость конденсационного температурного напора от потерь в конденсаторе

Потери в регулирующем вентиле, определяющие эксергетический КПД в пределах 0,97...0,98, соответствует данным, приведенным на рис. 10 [1].

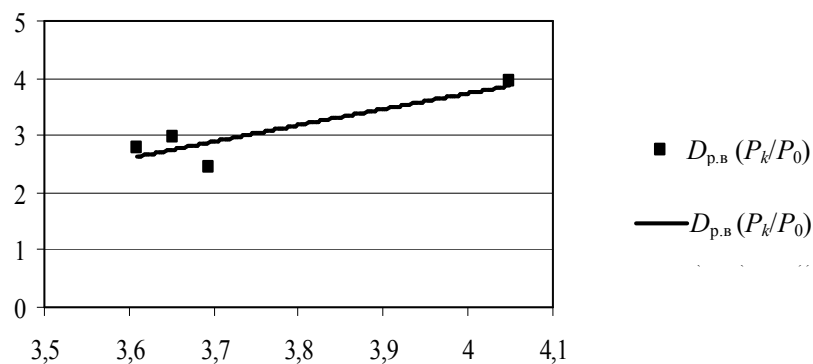


Рис. 10. Зависимость потерь в регулирующем вентиле от степени сжатия

Заключение

Эксергетический анализ экспериментальной одноступенчатой аммиачной холодильной машины при низкой температуре охлаждающей воды, обеспечивающей приближение к адиабатическому сжатию, позволил установить предельные значения потерь в поршневых компрессорах.

Анализ работы конденсатора позволил сделать заключение о загрязненности теплообменной поверхности.

Полученные значения потерь в элементах экспериментальной установки могут быть использованы при анализе действующих холодильных установок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Холодильные машины*: Учеб. / Под ред. Л. С. Тимофеевского. – СПб.: Политехника, 1997. – 99 с.
2. *Бродянский В. М., Фратиер В., Михалек К.* Эксергетический метод и его приложения. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 287 с.
3. *Галимова Л. В.* Лабораторный практикум по дисциплине «Теоретические основы энергоресурсосбережения в химической технологии». – Астрахань: Изд-во АГТУ, 2005. – 87 с.

Статья поступила в редакцию 31.01.2008

**MODELLING AND EXERGY ANALYSIS
OF THE ONE-STAGE AMMONIA EXPERIMENTAL
REFRIGERATION MACHINE**

L. V. Galimova, A. A. Kamnev, O. O. Lazarenko, C. Guidy Tonyon

The efficiency estimation of refrigeration machine units is determined on the basis of exergy efficiency definition which shows a degree of plant approach to an ideal. The purpose of matter is the analysis of the cycle of experimental refrigeration machine in operating conditions. For achievement of this aim the parameters of the working refrigeration machine have been taken, the incorporated technique of thermal design and exergy losses definition in elements of the refrigeration machine is developed and according to it calculations are carried out, the block diagram and the program code for thermal design, exergy losses definition in elements of the machine and in the cycle as a whole is developed, numerical experiment is carried out and adequacy of the program code is established, schemes of exergy flows and losses in elements of the circuit are constructed, the analysis of the received dependences is made and qualitative exergy reasons are given. Exergy analysis of the experimental one-stage ammonia refrigeration machine in conditions of low temperature of the cooling water, providing approximation to adiabatic compression, allows to define limiting values of losses in piston compressors. The analysis of the condenser work helps to make the conclusion about impurity heat exchanging surface. The received values of losses in elements of experimental plant can be used in the analysis of real refrigeration machine

Key words: the exergy analysis of the one-stage ammonia experimental refrigeration machine, exergy losses, cooling capacity, schemes of exergy flows.