

УДК 621.1.016.7

*Л. В. Галимова, Ю. Г. Гундарева, А. В. Костюрин, Ю. С. Хахалева*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДВУХСТУПЕНЧАТОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ**

Одним из направлений решения проблем энергосбережения является анализ работы технических систем, потребляющих и преобразующих энергию. Задача эксергетического анализа – оценка степени термодинамического совершенства технической системы в целом, а также выявление тех стадий технического процесса, на которых происходят основные потери эксергии (потенциальной работоспособности системы).

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

Процессы, происходящие в холодильных установках, как и все реальные процессы, сопровождаются потерями вследствие необратимости. Это означает, что часть подведённой к установке энергии, которая могла бы дать полезный эффект, не используется.

Оценка энергоэффективности агрегатов эксплуатируемой и модернизируемой холодильной установки может быть осуществлена на основе определения обобщенного показателя энергетической эффективности (эксергетического КПД), значение которого показывает степень приближения установки к идеальной.

Целью исследований являлся анализ двухступенчатой промышленной аммиачной холодильной установки одного из старейших предприятий пищевой промышленности г. Астрахани АО «Астраханьконсервпром». На первом этапе исследования необходимо было проанализировать результаты наблюдений за работой установки и создать метод для проведения обследования.

Для достижения поставленных целей необходимо было решить следующие задачи:

- разработать комплексную методику теплового и эксергетического расчётов элементов и холодильной машины в целом и в соответствии с ней определить показатели энергетической эффективности системы;
- разработать блок-схему и программный код теплового и эксергетического расчетов для определения показателей энергетической эффективности системы в изменяемых рабочих режимах;
- выполнить численный эксперимент и подтвердить адекватность программного кода.

В двухступенчатой холодильной машине осуществляется обратный цикл с полным промежуточным охлаждением паров холодильного агента после сжатия в компрессоре ступени низкого давления и с переохлаждением жидкого холодильного агента высокого давления в змеевике промежуточного сосуда. Промышленная установка создана на основе двух компрессорно-конденсаторных агрегатов АД-90-1.

Ступени низкого давления холодильной машины представлены компрессором Р-90 (КмСНД), ступени высокого давления – компрессором П-110 (КмСВД). Оба компрессора – бескрейцкопфные, выполнены на единой базе и широко унифицированы между собой.

Помимо оборудования, входящего в состав компрессорно-конденсаторных агрегатов, холодильная установка включает в себя следующие аппараты и приборы:

- промежуточный сосуд 600-СПА – вертикальный сварной цилиндрический аппарат, предназначенный для промежуточного охлаждения паров аммиака, нагнетаемых из цилиндров Р-90 СНД путем их барботажа через слои жидкого аммиака. В змеевике промежуточного сосуда происходит также переохлаждение жидкого холодильного агента высокого давления, направленного к испарителю;
- ресиверы: циркуляционный – 2,5-РДВа, 2 агрегата; 3,5-РДВа, 1 агрегат; дренажный – РД-2,5, 1 агрегат, 1,5-РД, 1 агрегат; линейный – 3,5-РД, 1 агрегат; 5-РД, 2 агрегата;
- насосы: аммиачный – Х45/31/41-В-2Г, 2 агрегата; водяной – 5СН3-А-1 агрегат; водяной СМ100-85-200/4, 1 агрегат.

Схема подачи хладагента насосная, непосредственное охлаждение. В охлаждаемом объекте расположены охлаждающие приборы (батареи коллекторные пристенные), в которых за счёт кипения жидкого холодильного агента осуществляется холодильное действие. Образовавшиеся

в батареях влажные пары аммиака поступают в циркуляционный ресивер, где разделяются на вторичную жидкость, возвращаемую в циркуляционный ресивер, и сухой насыщенный пар, поступающий во всасывающий трубопровод КмСНД. На линии всасывания компрессора установлен дроссельный расходомер. Перепад давления пара аммиака до и после расходомера определяется по дифференциальному манометру. Сжатые в компрессоре пары аммиака очищаются от масла в маслоотделителе и направляются для межступенчатого охлаждения в промежуточный сосуд.

Из промежуточного сосуда пары аммиака поступают на сжатие в КмСВД и далее, после очистки от масла в маслоотделителе 150-ОММ, подаются в конденсатор 125 КВ. Жидкий аммиак из конденсатора направляется в змеевик промежуточного сосуда, в котором переохлаждается до температуры близкой к температуре жидкости.

Ниже приведена методика теплового и эксергетического расчетов на примере одного из режимов. Исходные данные:

Давление конденсации.....	14,17 атм
Давление кипения.....	0,8 атм
Температура нагнетания КмСНД.....	113 °С
Температура нагнетания КмСВД.....	69,2 °С
Температура перед регулирующим вентилем (РВ).....	35,27 °С
Температура окружающей среды.....	29,3 °С
Температура в камере.....	17 °С

На рис. 1 представлен цикл холодильной машины в диаграмме I-Ig P.

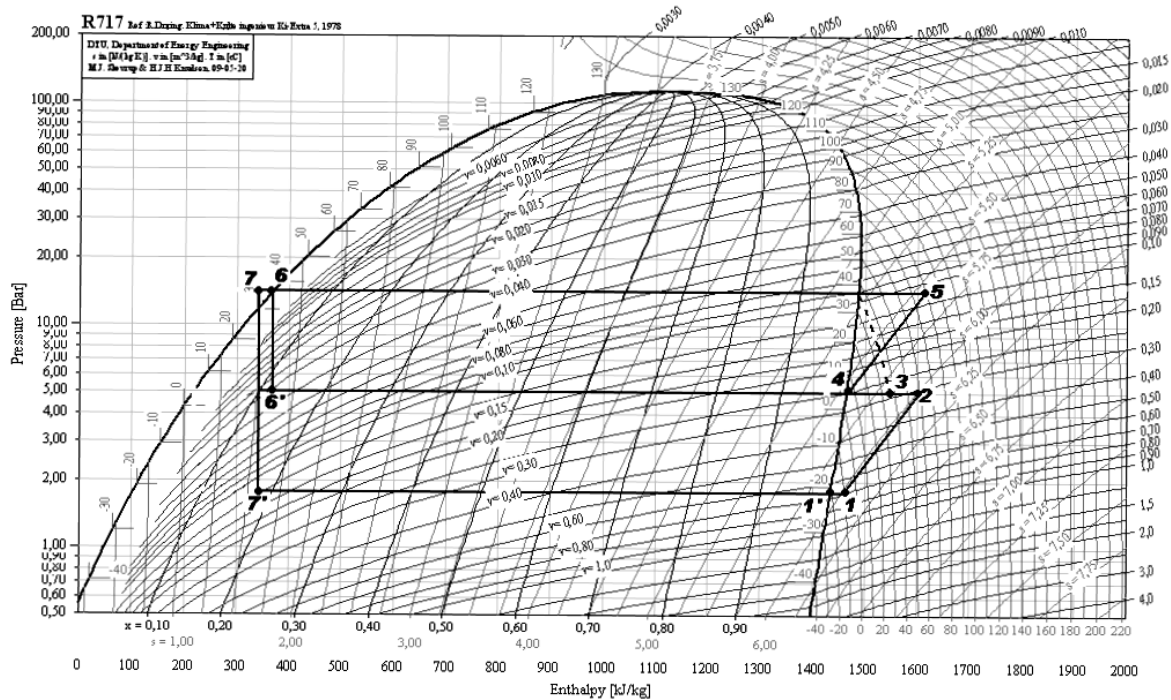


Рис. 1. Цикл холодильной машины

**Тепловой расчет**

1. Удельная холодопроизводительность, кДж/кг:

$$q_0 = i_1 - i_7 = 1434 - 363 = 1071.$$

2. Количество рабочего тела, сжимаемого в КмСВД, кг/кг:

$$1 + \alpha + \beta = \frac{i_3 - i_7}{i_4 - i_6} = \frac{1554 - 363}{1457 - 371} = 1,1.$$

3. Количество теплоты, отводимой из КМСВД, кДж/кг:

$$(1 + \alpha + \beta) \cdot q = (1 + \alpha + \beta) \cdot (i_5 - i_6) = 1,1 \cdot (1587 - 371) = 1335.$$

4. Количество теплоты, отводимой из промежуточного охладителя, кДж/кг,

$$q_{\text{охл}} = i_2 - i_3 = 1734 - 1554 = 180.$$

5. Количество теплоты, отводимой от рабочего тела, проходящего через змеевик, кДж/кг:

$$q_{\text{зм}} = i_6 - i_7 = 371 - 363 = 8.$$

6. Работа КМСНД, кДж/кг:

$$l_{\text{КМСНД}} = i_2 - i_1 = 1734 - 1434 = 300.$$

7. Работа КМСВД, кДж/кг:

$$(1 + \alpha + \beta) \cdot l_{\text{КМСНД}} = (1 + \alpha + \beta) \cdot i_5 - i_4 = 1,1 \cdot (1587 - 1459) = 140,8.$$

8. Работа цикла, кДж/кг,

$$l_{\text{КМСВД}} + (1 + \alpha + \beta) \cdot l_{\text{КМСНД}} = 300 + 1,1 \cdot (1587 - 1455) = 440,8.$$

9. Холодильный коэффициент:

$$\varepsilon = \frac{q_0}{l_{\text{ц}}} = \frac{1071}{440,8} = 2,43.$$

10. Проверка:

$$q_k = q_0 + l_{\text{КМСНД}} + l_{\text{КМСВД}}.$$

$$1335 = 1071 + 440,8,$$

$$1335 = 1511,8.$$

$$\Delta l = \left( \frac{q_k - (q_0 + l_{\text{КМСНД}} + l_{\text{КМСВД}})}{q_k} \right) \cdot 100 \% = \frac{1511,8 - 1335}{1511,8} \cdot 100 \% = 12 \%.$$

### Эксергетический расчет

11. Подведенная эксергия в КМСНД, кДж/кг:

$$E_{\text{КМСНД}} = \frac{l_{\text{КМСНД}}}{\eta_{\text{эл}} \cdot \eta_{\text{КМ}}} = \frac{300}{0,9 \cdot 0,83} = 401,6.$$

12. Приращение эксергии в КМСНД:

$$\Delta e(2; 1) = (i_2 - i_1) - T_{0,c} \cdot (S_2 - S_1) = (1734 - 1434) - 302,3 \cdot (6,46 - 5,91) = 120.$$

13. Потеря эксергии в КМСНД:

$$d_{\text{КМСНД}} = E_{\text{КМСВД}} - \Delta e_{2-1} = 401,6 - 120 = 281,6.$$

14. Подведенная эксергия в КМСВД, кДж/кг:

$$E_{\text{КМСВД}} = \frac{l_{\text{КМСВД}}}{\eta_{\text{эл}} \cdot \eta_{\text{КМ}}} = \frac{140,8}{0,9 \cdot 0,65} = 239,3.$$

15. Приращение эксергии в КМСВД, кДж/кг:

$$\Delta e(5; 4) = (1 + \alpha + \beta) \cdot (i_5 - i_4) - T_{0,c} \cdot (S_5 - S_4) = 1,1 \cdot (1587 - 1459) - 302,3 \cdot (5,44 - 6,51) = 183$$

16. Потеря эксергии в КМСВД, кДж/кг:

$$d_{\text{КМСВД}} = E_{\text{КМСВД}} - \Delta e_{5-4} = 239,3 - 183 = 56,3.$$

17. Потеря эксергии в конденсаторе, кДж/кг,

$$\nabla e(5; 6) = (1 + \alpha + \beta) \cdot ((i_5 - i_6) - T_{0,c} \cdot (S_5 - S_6)) = 1,1 \cdot ((1587 - 371) - 302,3 \cdot (5,44 - 1,58)) = 67,$$

$$\nabla e_{\text{кд}} = d_{\text{кд}},$$

$$\nabla e_{\text{кд}} = \Delta e(5; 6) = 67.$$

18. Потеря эксергии в РВ<sub>1</sub>:

$$\nabla e(6; 6') = (1 + \alpha + \beta) \cdot (-T_{0,c} \cdot (S_6 - S_{6'})) = 1,1 \cdot (-302,3 \cdot (-1,63 + 1,58)) = 16,6,$$

$$\nabla e(6; 6') = d_{\text{РВ}_1}.$$

19. Потеря эксергии в РВ<sub>2</sub>, кДж/кг:

$$\nabla e(7; 7') = -T_{0,c} \cdot (S_7 - S_{7'}) = -302,3 \cdot (1,56 - 1,67) = 33$$

$$\nabla e(7; 7') = d_{\text{РВ}_2}.$$

20. Приращение эксергии в испарителе, кДж/кг,

$$\Delta e_{\text{и}} = \Delta e(7; 1) = (-i_1 + i_7) - T_{0,c} \cdot (-S_1 + S_7) = (-1434 + 363) - 302,3 \cdot (-5,9 + 1,56) = 241,$$

$$\Delta e_{\text{и}} = eq_{\text{и}}.$$

21. Расчёт промсосуа

Эксергетическая температура потоков:

$$\tau_e = \frac{T_2 - T_{0,c}}{T_2} = \frac{113 - 29,3}{386} = 0,22,$$

$$\tau_{e2} = \frac{T_4 - T_{0,c}}{T_4} = \frac{(-5 - 29,3)}{286} = 0,13.$$

КПД промсосуа:

$$\eta = \frac{\tau_{e2} \cdot (1 + \alpha + \beta)}{\tau_{e1}} = \frac{1,1 \cdot (-0,13)}{0,22} = 0,65.$$

Потери эксергии в промсосуае, кДж/кг:

$$d_{\text{пс}} = 1 - 0,65 = 0,35.$$

22. Проверка:

$$E_{\text{КМСНД}} + E_{\text{КМСВД}} = d_{\text{КМСНД}} + d_{\text{пс}} + d_{\text{КМСВД}} + d_{\text{РВ}_1} + d_{\text{РВ}_2} + d_{\text{кд}} + eq_{\text{и}}$$

$$401,6 + 239,3 = 281,6 + 0,35 + 56,3 + 16,6 + 33 + 67 + 241$$

$$640,9 = 695,85,$$

$$\Delta 2 = \frac{((E_{\text{КМСНД}} + E_{\text{КМСВД}}) - (d_{\text{КМСНД}} + d_{\text{пс}} + d_{\text{КМСВД}} + d_{\text{РВ}_1} + d_{\text{РВ}_2} + d_{\text{кд}} + eq_{\text{и}}))}{E_{\text{КМСНД}} + E_{\text{КМСВД}}} \cdot 100 \% =$$

$$= \frac{(640,9 - 695,85)}{640,9} = 8 \%.$$

23. Полные потери эксергии в элементах системы:

$$D_{\text{КМСНД}} = \frac{d_{\text{КМСНД}}}{E_{\text{КМСНД}} + E_{\text{КМСВД}}} \cdot 100 = \frac{281,6}{640,9} \cdot 100 \% = 44 \% ,$$

$$D_{\text{ПС}} = \frac{d_{\text{ПС}}}{E_{\text{КМСНД}} + E_{\text{КМСВД}}} \cdot 100 = \frac{0,35}{640,9} \cdot 100 \% = 0,05 \%$$

$$D_{\text{КМСВД}} = \frac{d_{\text{КМСВД}}}{E_{\text{КМСНД}} + E_{\text{КМСВД}}} \cdot 100 = \frac{56,3}{640,9} \cdot 100 \% = 9 \%$$

$$D_{\text{КД}} = \frac{d_{\text{КД}}}{E_{\text{КМСНД}} + E_{\text{КМСВД}}} \cdot 100 = \frac{67}{640,9} \cdot 100 \% = 10,5 \% ,$$

$$D_{\text{РВ}_1} = \frac{d_{\text{РВ}_1}}{E_{\text{КМСНД}} + E_{\text{КМСВД}}} \cdot 100 = \frac{16,6}{640,9} \cdot 100 \% = 2 \% ,$$

$$D_{\text{РВ}_2} = \frac{d_{\text{РВ}_2}}{E_{\text{КМСНД}} + E_{\text{КМСВД}}} \cdot 100 = \frac{33}{640,9} \cdot 100 \% = 5,14 \% ,$$

$$D_{\text{еq}} = \frac{d_{\text{еq}}}{E_{\text{КМСНД}} + E_{\text{КМСВД}}} \cdot 100 = \frac{241}{640,9} \cdot 100 \% = 38 \% .$$

24. КПД элементов системы:

$$\eta_{\text{КМСНД}} = 100 - D_{\text{КМСНД}} = 100 - 44 = 56 \% ,$$

$$\eta_{\text{КМСВД}} = 100 - D_{\text{КМСВД}} = 100 - 9 = 91 \% ,$$

$$\eta_{\text{РВ}_1} = \frac{100 - D_{\text{КМСНД}} - D_{\text{КМСВД}} - D_{\text{КД}} - D_{\text{РВ}_1}}{100 - D_{\text{КМСНД}} - D_{\text{КМСВД}} - D_{\text{КД}}} = \frac{100 - 44 - 9 - 10,5 - 2}{100 - 44 - 9 - 10,5} \cdot 100 = 94 \% ,$$

$$\eta_{\text{РВ}_2} = \frac{100 - D_{\text{КМСНД}} - D_{\text{КМСВД}} - D_{\text{КД}} - D_{\text{РВ}_2}}{100 - D_{\text{КМСНД}} - D_{\text{КМСВД}} - D_{\text{КД}}} = \frac{100 - 44 - 9 - 10,5 - 5,14}{100 - 44 - 9 - 10,5} \cdot 100 = 86 \% ,$$

$$\tau_a = \frac{T_0 - T_{\text{о.с}}}{T_0 + 273} = \frac{(-21,5 - 29,3)}{251,5} = 0,2 ,$$

$$\tau_e = \frac{T_e - T_{\text{о.с}}}{T_e + 273} = \frac{(-17 - 29,3)}{263} = 0,18 .$$

КПД камеры:

$$\eta_{\text{кам}} = \frac{\tau_e}{\tau_a} \cdot 100 = \frac{0,18}{0,2} = 90 \% .$$

Потери эксергии в камере:

$$D_{\text{кам}} = 100 - \eta_{\text{кам}} = 100 - 90 = 10 .$$

Эксергетическая холодопроизводительность системы:

$$E_q = D_{\text{зи}} - D_{\text{кам}} = 37,81 - 8 = 29,81 \% .$$

По разработанной комплексной методике теплового и эксергетического расчёта элементов холодильной машины были определены показатели энергетической эффективности системы для 9-ти представленных рабочих режимов, полученных на основе результатов производственного эксперимента (наблюдений) на установке.

Результаты расчетов по статистическим данным всех режимов использованы в дальнейшем для определения адекватности разработанной программы.

В соответствии с блок-схемой на языке Visual Basic проведён численный эксперимент для выбранных рабочих режимов. На рис. 2 приведен пример расчета по программе для одного из режимов.

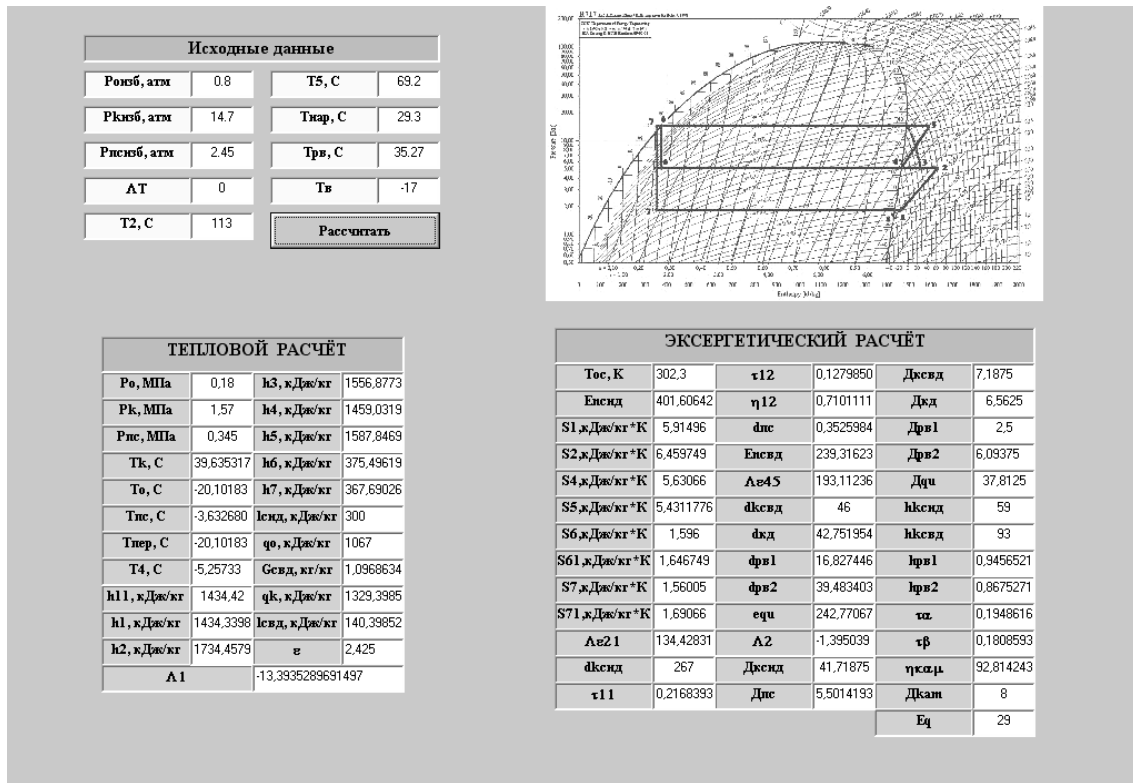


Рис. 2. Интерфейс программы

Для проверки адекватности программы необходимо было сравнить ручной и программный расчеты.

Результаты сравнения ручного и программного расчета для одного из режимов представлены в виде гистограммы.

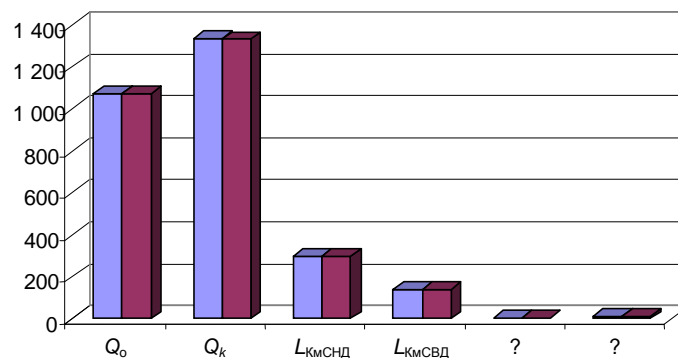


Рис. 3. Адекватность программы теплового расчета:  
 ■ – ручной расчет; ■ – программный расчет

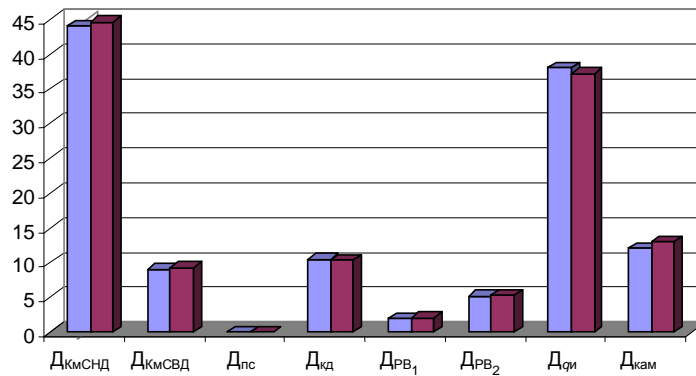


Рис. 4. Адекватность программы эксергетического расчета:  
 ■ – ручной расчет; ■ – программный расчет

Таким образом, для проведения анализа работы холодильной установки разработан метод исследования в виде комплексной программы теплового и эксергетического расчета.

Достаточно высокая сходимость результатов статистического расчета и численного эксперимента по элементам холодильной установке дает возможность сделать заключение о возможности применения разработанной программы для оценки эффективности системы в целом.

Статья поступила в редакцию 3.06.2009

#### MODELLING OF THE THERMODYNAMIC ANALYSIS OF A TWO-LEVEL REFRIGERATOR

*L. V. Galimova, Yu. G. Gundareva, A. V. Kostyurin, Yu. S. Khakhaleva*

The thermodynamic analysis of refrigerators is one of the solutions of the problem of power savings. The estimation of the efficiency of an industrial refrigerating installation is conducted on the basis of the definition of exergic efficiency. The possibility of the analysis of any two-level refrigerating installation is provided on the basis of modelling with the use of industrial experiment on a refrigerating installation of Ltd. "Astrakhankonservprom".

**Key words:** exergy, thermodynamic analysis, refrigerating installation, compressor, condenser.