

УДК 621.565.93

ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН

ЛЯХОВЕЦКАЯ-ТОКАРЕВА М. М.¹, к.т.н.

¹ Кафедра отопления, вентиляции и качества воздушной среды, Государственное высшее учебное заведение "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры", ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 47-02-98, e-mail: ov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-0338-4930

Аннотация. *Цель.* Целью данной работы является снижение общей потребности в энергии холодильных и рефрижераторных установок путем оптимизации этих установок. Для достижения поставленной цели предложено использование известных физических зависимостей с применением современной техники регулирования. *Методика.* В качестве параметров должны устанавливаться: температура испарения и конденсации холодильных машин; потребление мощности компрессорными холодильными машинами, как функция температуры конденсации и загрузки установки; изменение производительности испарительного охладителя по теплопередаче в зависимости от энтальпии воздуха; потребление мощности насосами и вентиляторами; загрузка установки; эксплуатационные пределы установки; взаимное влияние вышеуказанных параметров. *Результаты.* В ходе изучения различных процессов преобразования энергии возникает необходимость оценить термодинамическую эффективность процессов в целом и источники потерь в них. Для этого используется термодинамический метод – эксергетический. Представлены результаты эксергетических исследований для холодильной машины с разными температурами конденсации. *Научная новизна.* Оптимальная схема в регулировании должна учитывать вышеизложенные зависимости с целью минимального потребления мощности всеми приводами компрессоров, насосов и вентиляторов. Однако при этом нужно принимать эксплуатационные пределы различных компонентов установки. С помощью вычислительной машины рассчитывается энергетический оптимум. *Практическая значимость.* Таким образом, можно, в зависимости от загрузки установки при переменной температуре, определить оптимальную температуру охлаждающей воды. Затем при ней можно минимизировать подводимые в целом мощности приводов для компрессоров, водяных насосов и вентиляторов башенных охладителей. Эта оптимизация реализуется в замкнутом цикле путем использования системы регулирования с вычислительной машиной.

Ключевые слова: холодильная установка, теплообмен, испаритель, компрессор, насос, температура охлажденной воды, эксергия, эксергетический анализ

ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ХОЛОДИЛЬНИХ МАШИН

ЛЯХОВЕЦЬКА-ТОКАРЄВА М. М.¹, к.т.н.

¹ Кафедра опалення, вентиляції та якості повітряного середовища, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 47-02-98, e-mail: ov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-0338-4930

Анотація. *Мета.* Метою даної роботи є зниження загальної потреби в енергії холодильних і рефрижераторних установок шляхом оптимізації цих установок. Для досягнення поставленої мети запропоновано використання відомих фізичних залежностей із застосуванням сучасної техніки регулювання. *Методика.* В якості параметрів повинні встановлюватися: температура випаровування і конденсації холодильних машин; споживання потужності компрессорними холодильними машинами, як функція температури конденсації і завантаження установки; зміна продуктивності випарного охолоджувача по теплопередачі в залежності від ентальпії повітря; споживання потужності насосами і вентиляторами; завантаження установки; експлуатаційні межі установки; взаємний вплив вищезазначених параметрів. *Результати.* В ході вивчення різних процесів перетворення енергії виникає необхідність оцінити термодинамічну ефективність процесів у цілому та джерела втрат в них. Для цього використовується термодинамічний метод – эксергетичний. Представлені результати эксергетичних досліджень для холодильної машини з різними температурами конденсації. *Наукова новизна.* Оптимальна схема в регулюванні повинна враховувати вищевикладені залежності з метою мінімального споживання потужності всіма приводами компрессорів, насосів і вентиляторів. Однак при цьому потрібно брати експлуатаційні межі різних компонентів установки. За допомогою обчислювальної машини розраховується енергетичний оптимум. *Практична значимість.* Таким чином, можна, у залежності від завантаження установки при змінній температурі, визначити оптимальну температуру охолоджуючої води. Потім при ній можна мінімізувати підводиться в цілому потужності приводів для компрессорів, водяних насосів і вентиляторів баштових охолоджувачів. Ця оптимізація реалізується в замкнутому циклі шляхом використання системи регулювання з обчислювальною машиною.

Ключові слова: холодильна установка, теплообмін, випарник, компрессор, насос, температура охолодженої води, эксергія, эксергетичний аналіз

RATIONALE THE EFFICIENCY OF REFRIGERATING MACHINES

LYACHOVETSKAYA-TOKAREVA M. M.¹, *PH.D. (TECH.)*

¹ Department of heating, ventilation and quality of air environment, State Higher Education Establishment “Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-16-00, e-mail: ov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-0338-4930

Abstract. Purpose. The aim of this work is the reduction of overall energy requirements of refrigeration and refrigerating plants by optimizing these settings. To achieve this goal the proposed use of the known physical dependency with the use of modern technology regulation. **Methodology.** Parameters must be set: temperature of evaporation and condensation refrigerating machines; power consumption compressor chillers as a function of condensing temperature and download installation; changes in the performance of the evaporative cooler on heat transfer depending on the enthalpy of the air; the power consumption of pumps and fans; download installation; operational limits of the plant; the mutual influence of the above parameters. **Findings.** During the study of various energy conversion processes there is a need to evaluate the thermodynamic efficiency of the processes and the sources of loss in them. To do this, use thermodynamic method – exegetically. To presents the results of the energy studies for refrigerating machines with different condensing temperatures. **Originality.** Optimal scheme in regulation needs is to consider these dependencies in order to minimize the power consumption of all the drives of compressors, pumps and fans. However, it is necessary to take operational limits of the various components of the installation. Using computers is calculated the energy optimum. **Practical value.** Thus, it is possible, depending on download install for variable temperature, to determine the optimal temperature of the cooling water. Then, when it can be applied to minimize the overall power drives for compressors, water pumps and tower fans chillers. This optimization is implemented in a closed loop through the use of the regulatory system from the computing machine.

Keywords: refrigeration system, heat exchange, evaporator, compressor, pump, chilled water temperature, exergy, exergy analysis

Введение

Холодильные и рефрижераторные установки эксплуатируются во многих отраслях (системы кондиционирования воздуха и т.д.). Можно достичь экономии расходов на энергию и эксплуатацию путем последовательного использования известных физических зависимостей с применением современной техники регулирования.

Путем оптимизации установки общая потребность установки в энергии (холодильных компрессоров, водяных насосов, вентиляторов, установок охлаждения оборотной воды) в зависимости от внешних и внутренних параметров сводится к минимуму [1].

Цель

Целью данной работы является снижение общей потребности в энергии холодильных и рефрижераторных установок путем оптимизации этих установок. Для достижения поставленной цели предложено использование известных физических зависимостей с применением современной техники регулирования.

Методика

В качестве параметров должны устанавливаться [2]:

- температура испарения и конденсации холодильных машин;
- потребление мощности компрессорными холодильными машинами, как функция температуры конденсации и загрузки установки;

- изменение производительности испарительного охладителя по теплопередаче в зависимости от энтальпии воздуха;

- потребление мощности насосами и вентиляторами;

- загрузка установки;

- эксплуатационные пределы установки;

- взаимное влияние вышеперечисленных параметров.

Требуемая холодопроизводительность установки по холодной воде в замкнутом цикле создается подводимой мощностью компрессоров.

Обе мощности, согласно первого закона термодинамики, преобразуются в подлежащей отводу теплоту конденсации, которая отводится через охладитель в окружающую среду.

Этот теплообмен с окружающей средой подвержен влиянию внешних условий, т.е. колебания энтальпии воздуха в зависимости от времени дня и периода года.

Эти изменения оказывают очень сильное влияние на холодопроизводительность башенных охладителей (градирен) при постоянстве подводимой мощности вентиляторов и насосов.

В зависимости от разницы энтальпий холодоагента после конденсатора и энтальпией наружного воздуха может отводиться различное по величине количество теплоты конденсации. Величина отводимой теплоты конденсации оказывает влияние на температуру конденсации, а следовательно, на потребление мощности компрессором. Последнее снова влияет на конденсацию.

Как правило, охладители воды работают в расчетном режиме менее 1% общего времени года. В оставшийся период времени они работают в условиях, отличающихся от расчетного режима.

Например, при средней температуре атмосферного воздуха и также при более низком уровне его влажности.

Производительность воздухоохладителя не является постоянной величиной, она зависит от величины потоков воздуха и воды, от начального состояния охлаждаемого воздуха и холодной воды. Разности температур и давления водяного пара являются критериями интенсивности теплопередачи.

Эти величины показаны на рис.1: максимальная разность температур Δt_{\max} представлена на ординате, максимальная разность влажности воздуха Δx_{\max} – на оси абсцисс. Последняя определена как разность между содержанием водяного пара в охлаждаемом и

охлажденном до температуры холодной воды воздухе. Так как на состояние воздуха в месте установки воздухоохладителя до начала процесса охлаждения воздействовать практически невозможно, то из этого следует очень важный вывод, что температуру поступающей холодной воды надо сделать столь низкой, сколь это позволяют технические возможности. Как показано на рис. 1, с понижением температуры холодной воды на входе в воздухоохладитель повышается потенциал как температуры, так и давления паров воды.

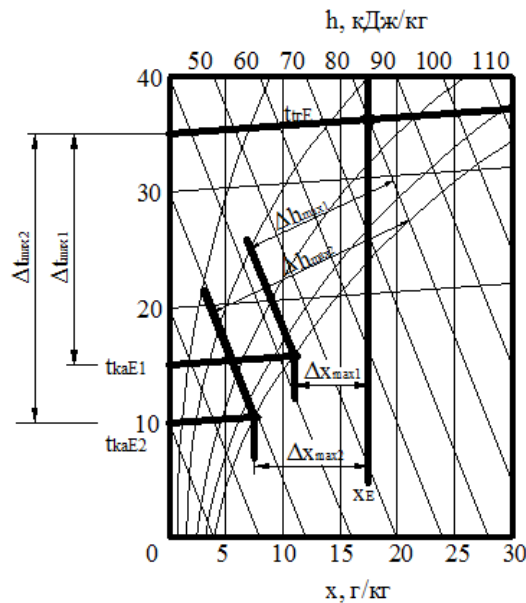


Рис. 1 Изменение состояния охлажденного воздуха при понижении температуры холодной воды на входе в воздухоохладитель: t_{tZE} – начальная температура воздуха по сухому термометру; t_{KaE} – температура холодной воды на входе в воздухоохладитель; x – влажность воздуха; h – теплосодержание воздуха

Changing the state of cooled air when the temperature of the cold water inlet to air cooler: t_{tZE} – initial air temperature on the dry thermometer; t_{KaE} – temperature of the cold water inlet to the coil; x – is the moisture of the air; h – enthalpy of air

Дальнейшее уменьшение количества холодильного агрегата в испарителе приводит к его накоплению в конденсаторе, уменьшению эффективной внутренней теплообменной поверхности и некоторому повышению давления конденсации. Вместе с тем падает и давление на линии всасывания (рис.2). Таким образом, перепад давлений на капилляре возрастает. Кроме того, переохлаждение дросселируемой жидкости приводит к возрастанию расхода через капиллярную трубку из-за увеличения плотности. Происходит «саморегулирование» системы. Но установка становится малоэффективной, так как при понижении температуры наружного воздуха

испаритель заполняется не полностью, что влечет за собой уменьшение холодопроизводительности. Немаловажно и то, что при сильных морозах давление всасывания может быть ниже расчетного, а, как известно, такие режимы работы нежелательны для холодильных установок, т.к ухудшается возврат масла в компрессор.

Когда охладитель (испаритель) работает в нерасчетных условиях, охлаждающая нагрузка может быть ниже предусмотренной расчетами и температура оборотной воды может быть ниже расчетной.

Это позволяет сделать установку более экономичной в плане энергопотребления.

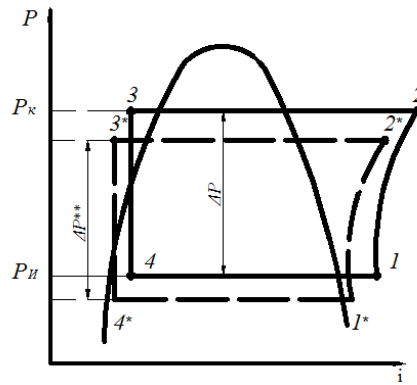


Рис.2 Работа холодильной машины при пониженной температуре окружающего воздуха (установившийся режим)

The chiller performance at low ambient temperature (steady state)

Работы ХМ в "неординарном" режиме (температура окружающей среды ниже температуры охлаждаемого объекта).

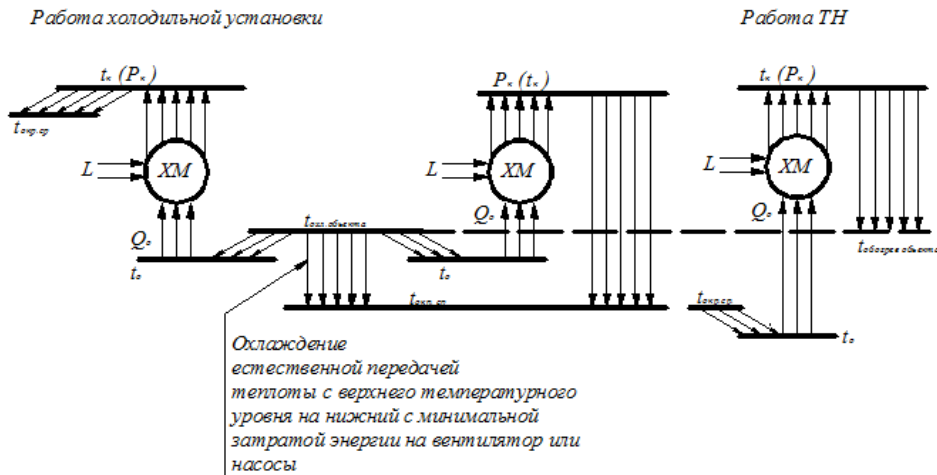


Рис.3 Механизм передачи теплоты для различных условий работы холодильной машины: Q_0 – теплота, отведенная от объекта за счет кипения хладагента в испарителе; L – энергия, затраченная компрессором на сжатие хладагента; t_0 – температура кипения хладагента в испарителе; t_k, P_k – температура и давление конденсации; $t_{охл. об.}, t_{обогр. об.}$ – температура охлаждаемого и обогреваемого объекта (температура воздуха в помещении); $t_{окр.ср.}$ – температура окружающей среды

The mechanism of heat transfer for different conditions of operation of the refrigeration machine: Q_0 – is the heat removed from the object due to boiling of the refrigerant in the evaporator; L – is the energy expended by the compressor to compress the refrigerant; t_0 – temperature of the boiling refrigerant in the evaporator; t_k, P_k – temperature and condensation pressure; $t_{охл. об.}, t_{обогр. об.}$ – about the temperature of the cooled and the heated object (the temperature in the room); $t_{окр.ср.}$ – ambient temperature

При более низких нагрузках испаритель (воздухоохладитель) может осуществлять необходимое охлаждение даже если температура охлаждающей воды на входе несколько выше, так как необходимость в удалении влаги меньше. При повышении температуры охлажденной воды на выходе из установки нагрузка компрессора понижается и это обуславливает уменьшение энергопотребления.

Выбор значения температуры охлажденной воды позволяет достичь экономию энергии в системах кондиционирования воздуха с непрерывной циркуляцией охлажденной воды. При переменной циркуляции охлажденной воды для выбора значения температуры охлажденной воды необходимы дополнительные исследования.

Результаты

Повышение температуры охлажденной воды на выходе позволяет снизить расход энергии охладителем (испарителем) и приводит к повышению потребления энергии насосом, т.к. для необходимого охлаждения до той же температуры требует больше охлаждающей воды.

Будет ли экономия энергии в охладителе более существенной с дополнительными затратами в насосе – зависит от особенностей системы.

При более низкой температуре охлаждающей воды конденсатора снижается температура конденсации и давление холодоагента, в результате двигатель компрессора потребляет меньше энергии. При полной нагрузке экономия энергии составляет 1,5 % при каждом снижении температуры конденсации воды на входе на 1°C.

Научная новизна и практическая значимость

В ходе изучения различных процессов преобразования энергии возникает необходимость оценить термодинамическую эффективность процессов в целом и источники потерь в них. Для этого используется термодинамический метод – эксергетический.

Приведенные соображения наглядны в таблице 1, где представлены результаты эксергетических исследований для холодильной машины с разными температурами конденсации, а на рис. 4 указанные расчеты приведены графически в виде потоков эксергии [3].

По мощности теплопередачи башенных охладителей (градирен) потребности в мощности для водяных насосов и вентиляторов составлены специфические для установки расчетные характеристики. Температура мокрого термометра описывает теоретический предел охлаждения, вплоть до предела охлаждения при теоретической бесконечной обменной площади башенного охладителя (градирни), который мог охладить конденсаторную воду. Из-за ограничений обменной поверхности башенного охладителя (градирни) охлаждение воды не достигает температуры мокрого термометра. Эта разница температур определяется как дистанция границы охлаждения и в расчетной точке устанавливается путем определения параметров башенного охладителя (градирни). Проектирование башенного охладителя производится по максимуму температуры мокрого термометра, при которой еще должна быть обеспечена расчетная мощность установки.

Таблица 1

Результаты эксергетических исследований для холодильной машины с разными температурами конденсации

The results of exergy studies for refrigerating machines with different temperatures of condensation

Условия процессов		
	Вариант А	Вариант Б
Температура наружной среды T_n	290°K = 17°C	290°K = 17°C
Температура охлаждаемого помещения T_o	258°K = -15°C	258°K = -15°C
Температура испарения T_o^x	253°K = -20°C	250°K = -23°C
Температура конденсации T	298°K = 25°C	301°K = 28°C
Температура переохлаждения, $T_{ук}$	293°K = 20°C	296°K = 23°C
$\eta_{isentrop}$	0,80	0,78
Холодоагент	R 12	R 12
Давление в конденсаторе	1,5103 бар	1,3418 бар
Давление в испарителе	6,5102 бар	7,0566 бар
Результаты расчетов		
Удельная холодопроизводительность q_o , кДж/кг	126,11	121,71
Работа компрессора w_t , кДж/кг	32,04	37,36
Холодильный коэффициент ε	3,94	3,26
Подведенная к охлаждаемому помещению эксергия, кДж/кг	15,64	15,10
Отведенная эксергия, кДж/кг	141,75	136,81
Эксергетический КПД ξ	0,488	0,404
Потери эксергии в испарителе $e_{висп}$, кДж/кг	2,80	4,38
Потери эксергии в компрессоре $e_{вкомпр}$, кДж/кг	5,48	7,33
Потери эксергии в конденсаторе $e_{вконд}$, кДж/кг	4,48	5,94
Потери эксергии в дроссельном вентиле $e_{вDross}$, кДж/кг	3,64	4,16
Суммарные потери эксергии e_v , кДж/кг	16,40	22,26

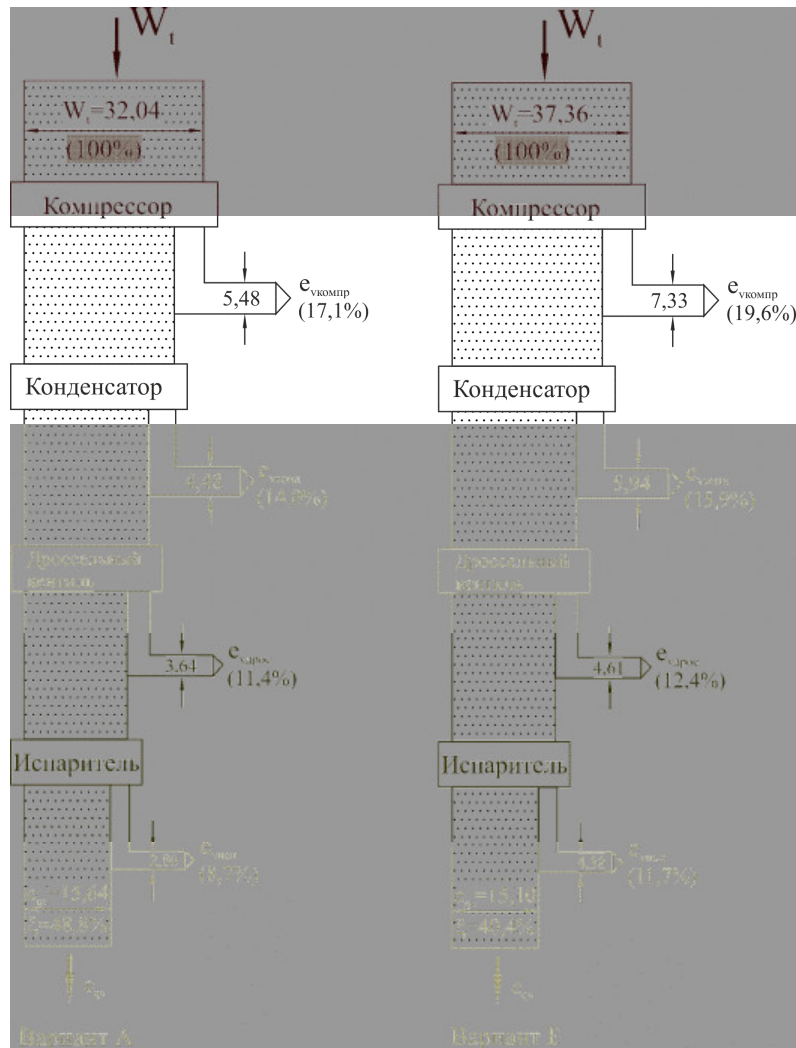


Рис.4 Результаты эксергетических исследований для холодильной машины с разными температурами конденсации графически в виде потоков эксергии

The results of exergy studies for refrigerating machines with different temperatures of condensation graphically by a flow of exergy

Выводы

Оптимальная схема в регулировании должна учитывать вышеизложенные зависимости с целью минимального потребления мощности всеми приводами компрессоров, насосов и вентиляторов. Однако при этом нужно принимать эксплуатационные пределы различных компонентов установки.

С помощью вычислительной машины рассчитывается энергетический оптимум. Таким

образом можно, в зависимости от загрузки установки при переменной температуре, определить оптимальную температуру охлаждающей воды. Затем при ней можно минимизировать подводимые в целом мощности приводов для компрессоров, водяных насосов и вентиляторов башенных охладителей. Эта оптимизация реализуется в замкнутом цикле путем использования системы регулирования с вычислительной машиной. Способ действия представлен на рис. 5.

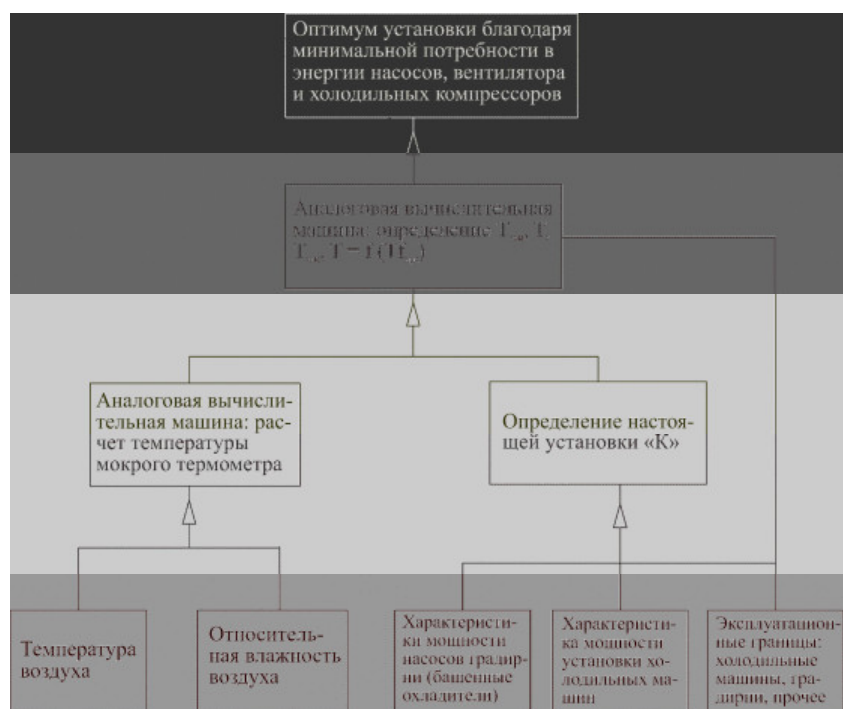


Рис.5 Способ действия системы регулирования работы холодильной установки

Method to control operation of the refrigeration unit

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Bretting H. L. Kühlenanlage optimiert / Bretting H. L. – G. : Betrieb und Enrgie, 1/83, 1983. – pp. 75-76.
2. Эндрю Буркхарт. Семь методов повышения эффективности работы охлаждающих установок / Эндрю Буркхарт // Американское общество инженеров по отоплению, охлаждению и кондиционированию воздуха (ASHRAE) Энергосовет. – 2013. – № 4 (29). – С. 48–53.
3. W. Reif. Exergetische Untersuchungen an Kaldampf-Kälteanlagen / W. Reif. – G.: Heft 4, Eingelangt, November 1974. – pp. 111-114.
4. Мюке Г. Проветривание шахт и кондиционирование воздуха при разработке угля на больших глубинах / Мюке Г. // Издательство «Недра», «Глюкауф», русский перевод, 1985. - №4. – С. 10-18.
5. Савицкий Н. В., Скрыпников В. Б., Ляховецкая-Токарева М. М., Шапран Я. Н. Влияние параметров внешней среды на эффективность холодильных установок / Савицкий Н. В. // Сборник научных трудов. Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия «Энергетика, экология, компьютерные технологии в строительстве». - Днепрпетровск, 2015. – Вып. 82. – С. 247-253.
6. Скрыпников В. Б., Ляховецкая-Токарева М. М., Завгородняя Е. П., Шапран Я. Н. Оптимизация режимов работы холодильных машин. / Скрыпников В. Б. // Сборник научных трудов. Институт геотехнической механики национальной академии наук Украины. – Днепрпетровск, 2015. - №125. – С. 241-250.

REFERENCES

1. Bretting, H. L. Refrigeration system optimized. G. : operation and Enrgie, 1/83, 1983. – pp. 75-76.
2. Andrew Burkhart. Sem' metodov povysheniya effektivnosti raboty ohlazhdayushchih ustanovok (Seven methods to increase the efficiency of the cooling units): American society of engineers for heating, cooling and air conditioning (ASHRAE) Energosbyt. – 2013. – № 4 (29). – pp. 48-53.
3. W. Reif. Exergetische investigations on cold-vapour refrigeration systems / W. Reif. – G.: Issue 4, Received, November 1974. – pp. 111-114.
4. Mucke G. Provetrivanie shaht i kondicionirovanie vozduha pri razrabotke uglja na bol'shiih glubinah [Mine Ventilation and air conditioning in the development of coal at great depths]: Publishing house "Nedra", "glückauf", Russian translation, 1985. - No. 4. – pp. 10-18.
5. Savytskyi M.V., Skrypnikov V.B., Lyakhovetskaya-Tokareva M.M., Shapran Y.N. Vliyanie parametrov vneshnej sredy na effektivnost' holodil'nyh ustanovok [The influence of environmental parameters on the efficiency of refrigeration systems] / Savytskyi M.V., // Collection of scientific works. Construction, material science, mechanical engineering. The series "Energy, ecology, computer technology in construction". - Dnepropetrovsk, 2015. – Vol. 82. – pp. 247-253.
6. Skrypnikov V. B., Lyakhovetskaya-Tokareva M. M., Zavgorodnyaya E. P., Y. Shapran Y. N. Optimizacija rezhimov raboty holodil'nyh mashin [Optimization of modes of operation of refrigerating machines]. / Skrypnikov V. B. // Collection of scientific works. Institute of geotechnical mechanics of national Academy of Sciences of Ukraine. – Dnepropetrovsk, 2015. - No. 125. – pp. 241-250.