

УДК 621.565.9.001.57

Анализ методов снижения энергопотребления систем холодоснабжения предприятий в процессе круглогодичной эксплуатации

Канд. техн. наук Е. Т. ПЕТРОВ¹, канд. техн. наук А. А. КРУГЛОВ²,

¹Petrov_ET@refropkb.ru, ²kruglov@refropkb.ru

Университет ИТМО

191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

Канд. техн. наук Н. И. РУКОБРАТСКИЙ

rukobratsky@pochta.ru

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4

Авторами статьи представлены материалы по методам снижения эксплуатационных затрат при комплексном рассмотрении теплохладоэнергетических систем предприятий при переменных условиях эксплуатации, по рациональному использованию естественного холода и вторичных энергетических ресурсов. Предложен спектр технических решений, обеспечивающих повышение энергетической эффективности производств, потребляющих холод. Особое внимание уделено использованию естественного холода и частотно-регулируемых приводов электродвигателей. Представлены основные положения параметрической оптимизации систем холодоснабжения с учетом особенностей круглогодичной эксплуатации, отражены особенности изменения характеристик компрессорного оборудования и расхода электроэнергии при отказе от стабилизации давления конденсации. В работе использовались материалы исследований по отдельным методам снижения уровня энергопотребления систем холодоснабжения (использование частотного регулирования, различных средств управления, компенсация реактивной мощности и др.). Сформулированы основные принципы оптимального адаптивного управления в процессе эксплуатации холодильных систем. В результате исследований выявлена перспективность системного подхода с использованием принципа «энерготехнологии», ВЭРов и естественного холода при комплексном проектировании теплохладоэнергетических систем предприятий.

Ключевые слова: электроэнергия, система, холодоснабжение, энергопотребление, предприятие, эксплуатация, оптимизация, регулирование, компрессор, конденсатор.

Analysis of energy consumption reduction methods in refrigeration systems during year-round exploitation

Ph. D. E. T. PETROV¹, Ph. D. A. A. KRUGLOV²

¹Petrov_ET@refropkb.ru, ²kruglov@refropkb.ru

ITMO University

191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

Ph. D. N. I. RUKOBRATSKIY

rukobratsky@pochta.ru

Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering
190005, Russia, St. Petersburg, 2-nd Krasnoarmeiskaya Str. 4

Existing publications do not sufficiently explore problems of systematic approach for equipment selection and management practices that reduce enterprise energy consumption. Methods for reducing operating costs in comprehensive analysis of heating, cooling and electricity systems of enterprises under variable operating conditions, and for rational use of natural cold and secondary energy sources are not presented well by existing works. In the article study a number of technical solutions that provide higher energy efficiency of cold-consuming plants are proposed. High attention is paid to the usage of natural cold and motor drives with frequency control. Basics of parametric optimization of refrigeration systems taking into account year-round operation, changes of characteristics of compressor equipment and power consumption in case of operation at a variable condensing pressure are presented. Different methods of energy consumption reduction in refrigeration systems (frequency control, different management systems, reactive power compensation, etc.) were reported. Basic principles of optimal adaptive control in the operation of such systems are formulated. This research reveals significant opportunities for systematic approach using principles of «energy technology», secondary energy sources and natural cold for comprehensive design of enterprise heating, cooling and electricity systems.

Keywords: electrical energy, system, cold supply, power consumption, enterprise, exploitation, optimization, regulation, compressor, condenser.

Современные предприятия представляют собой сложные производственные объекты, включающие:

- основные технологические комплексы;
- комплексы теплохладоснабжения;
- комплексы вспомогательных и административно-бытовых подразделений.

Поиск оптимальных решений в системе предприятия, как в ходе проектирования, так и в процессе эксплуатации должен базироваться на совместном анализе теплотехнических, технологических и экологических параметров всех его подразделений. При этом необходим комплексный подход при оценке эффективности работы, как всего предприятия, так и его подразделений. Проектирование и реконструкцию любого производства следует осуществлять с помощью методов «энерготехнологии» производства, совмещающих методы синтеза и анализа подсистем производств с учетом эффективности использования энергии, как внутренних энерго-технологических потоков, так и внешних энергетических потоков (в виде потоков холода, тепла, электроэнергии и др.)

Учитывая повышение интенсивности роста цен на энергоносители, следует особое внимание уделять разработке и совершенствованию методов энергопотребления предприятий с учетом изменения его мощности в процессе эксплуатации.

Системный подход и иерархическая структура всего производства и отдельных его подсистем формируют требования к структурной схеме управления производством. От корректности методов оптимального управления всеми подсистемами теплохладоэнергетического комплекса, согласованной работы отдельных подсистем с учетом реальных графиков потребления зависит надежность и эффективность работы как отдельных агрегатов, подсистем, цехов, так и предприятия в целом.

Использование системного подхода и совмещения принципов декомпозиции и композиции [1, 2] позволяет сформировать иерархическую структуру предприятия, выделить отдельные подсистемы различных видов энергетического обеспечения. Для каждой из выделенных подсистем формируются методики скоординированного оптимального управления, обеспечивающих получение максимального снижения уровня энергопотребления на производство единичного условного продукта.

Повышение энергетической эффективности производств, потребляющих холод, охватывает целый спектр технических решений в следующих областях:

- энергоэффективности строительных конструкций зданий и сооружений;
- энергоэффективности электрических систем;
- энергоэффективности систем холодоснабжения;
- энергоэффективности систем вспомогательного энергетического обеспечения (отопление, вентиляция, воздухообеспечение, водоснабжение, канализация);
- эффективности технологических производств, обеспечивающих оптимальный объем, ассортимент и качество продукции с возможностью утилизации сбросной энергии.

Энергоэффективность строительных конструкций зданий достигается за счет повышения сопротивления теплопередаче всех ограждений, использования новых конструкций, технологий и материалов.

Особое значение в настоящее время приобретает уровень энергоснабжения крупных производств. Повышение эффективности использования всех видов энергетических ресурсов для производственных предприятий является важным аспектом в общей задаче оптимизации производств. При этом особое значение имеет надежность и эффективность работы энергогенерирующих систем. Резкое снижение качества энергетической инфраструктуры в результате разделения РАО ЕС России привело к серьезным проблемам в эксплуатационном и техническом обслуживании, системе ценообразований и т. д.

Снижение надежности централизованного энергоснабжения приводит к использованию распределенной генерации и развитию малой энергетики [3]. Строительство мини-ТЭС с применением принципов когенерации [4] является одним из наиболее перспективных путей развития энергетики страны, несмотря на определенные технические проблемы, сопряженные с распространением распределенной генерации. Положительный опыт в этом направлении уже имеется на целом ряде крупных предприятий.

При строительстве новых и реконструкции действующих предприятий довольно широко используются автономное энергоснабжение от модульных ТЭС с использованием различных видов топлива [5].

Очевидно, что в настоящее время необходимо ставить задачи проектирования комплексных теплохладоэнергетических систем, использующих как централизованное, так и децентрализованное энергоснабжение.

На ряде предприятий уже делаются попытки создать системы, обеспечивающие управление в реальном масштабе времени всем теплохладоэнергетическим комплексом согласно производственной программе, сформированной предварительно по результатам технико-экономических оптимизированных исследований. На каждом этапе выполнения производственной программы формируется совокупность методов оптимального управления всем комплексом теплохладоэнергоснабжения.

В отдельных случаях успешно осуществляется формирование автономной энергетической системы предприятия, состоящей из агрегатов различных производителей, объединенных в единую информационно-управляющую систему.

Основными энергопотребителями предприятий с использованием холода является:

- компрессорное оборудование;
- конденсаторы различного исполнения, включающие насосное и вентиляторное оборудование;
- воздухоохладители, включающие вентиляторное оборудование;
- насосное технологическое оборудование;
- кондиционеры воздуха, включающие вентиляторное и насосное оборудование и др.

При неизменности технологического регламента в ходе реконструкции предприятия задача оптимизации сводится к достижению условия:

$$\min_{\tau} \int a_{\tau} dt = \min_{\tau} \sum_{\tau=0}^T a_{\tau},$$

где Z_{τ} — эксплуатационные затраты в году τ ; T — горизонт расчета; a_{τ} — коэффициент дисконтирования.

Эксплуатационные затраты определяются по соотношению:

$$Z_{\tau} = \sum_i Z_{\tau i} a_{\tau i},$$

где $Z_{\tau i} = (\sum_j N_{ji} \cdot C_{13} + V_w \cdot C_{1w}) \tau_i$ — среднерасчетные эксплуатационные затраты в i -ом месяце года, включающие затраты на электроэнергию и подпитку системы оборотного водоснабжения; τ_i — время работы оборудования в i -ом месяце; C_{13} — стоимость электроэнергии, руб./кВт·ч; C_{1w} — стоимость 1 м³ воды, руб./м³; N_{ji} — электрические мощности, потребляемые двигателями компрессорно-конденсаторного оборудования, воздухоохладителей, насосного, технологического и кондиционного оборудования.

При работе на частичных нагрузках мощности, потребляемая каждым типом оборудования мощность, в значительной степени зависит от уровня КПД.

$$\eta_3 = \eta_r \cdot \eta_{\text{мех}} \cdot \eta_{\text{дв}},$$

где η_r — гидравлический КПД; $\eta_{\text{мех}}$ — механический КПД; $\eta_{\text{дв}}$ — КПД электродвигателя.

В этом случае необходимо решение, позволяющее одновременно воздействовать на все три составляющие КПД η_3 , с целью поддержания его на высоком уровне (при максимальном соответствии механических свойств электродвигателя и агрегата).

В настоящее время к основным мероприятиям по повышению энергоэффективности электрических систем [6] относятся:

- установка конденсаторов реактивной мощности (для повышения $\cos\phi$ до 0,8 и более конденсаторных установок, синхронных двигателей, работающих в режиме перевозбуждения);

- использование частотно-регулируемых приводов электродвигателей с применением микропроцессорного управления;

- повышение качества электрической энергии.

Расчетная величина реактивного тока потребителя, которая должна быть скомпенсирована, определяется по формуле:

$$I_{pk} = I_r (\text{tg } \phi - \text{tg } \phi_{\text{рац}}),$$

где I_r — активная составляющая тока электроустановки; ϕ — фазовый сдвиг; $\phi_{\text{рац}}$ — фазовый сдвиг, обеспечивающий рациональные условия работы электроустановки ($\text{tg } \phi_{\text{рац}}$ обычно принимают $0,43 \div 0,33$, при этом $\cos \phi_{\text{рац}} = 0,92 \div 0,93$).

Экономия электроэнергии при установке конденсатора составляет:

$$\Delta W = R (I^2 - I_k^2) \tau_p,$$

где R — активное сопротивление неразветвленной части электрической цепи (питающей линии); I — ток до установки конденсатора; I_k — ток в условиях компенсации; τ_p — время работы.

Применение преобразователей частоты в системах электропривода позволяет достичь экономии электроэнергии от 35 до 65%. Одновременно, если электропривод используется в водоснабжении и теплоснабжении, экономия воды и тепла составляет примерно до 15%.

В настоящее время одним из перспективных методов оптимального управления при частичных нагрузках

АД является использование полупроводниковых преобразователей частоты тока, позволяющих плавно в широком диапазоне регулировать скорость вращения и момент, а также избавиться от пусковых токов. Изменение частоты вращения всех гидравлических машин приведет к изменению производительности и потребляемой мощности, а гидравлических машин динамического действия (центробежные компрессоры, центробежные насосы, вентиляторы) — к дополнительному изменению напорно-расходной характеристики. Характер изменения КПД асинхронного электропривода с изменением частоты вращения показан на рис. 1. В этом случае снижение частоты вращения в соответствии с технологической нагрузкой позволяет не только экономить энергию при совершении работы, но и получить экономический эффект за счет повышения КПД как привода, так и любой гидравлической машины (насоса, компрессора, вентилятора).

В частотно-регулируемых приводах, целесообразно использовать асинхронные двигатели АДЧР, специально предназначенные для работы в комплектных приводах [7, 8].

Отличие асинхронных двигателей АДЧР от общепромышленных заключается в применении специальной обмотки статора, низком уровне вибрации, более надежном подшипниковом узле, наличие независимой вентиляции и возможности комплектации дополнительным оборудованием (электромеханическим тормозом, датчиком обратной связи и др.).

Основные преимущества АДЧР:

- снижение нагрузки на электрическую сеть;
- уменьшение пусковых токов;
- экономия электроэнергии до 50%;
- гибкость управления технологическими процессами.

Эффективность использования частотно-регулируемых приводов может быть определена согласно [9]. Современные системы электроснабжения предприятий оснащены эффективными устройствами управления электродвигателей (блоки таймеров, интерфейсные модули, блоки защиты и т.п.), это позволяет создавать эффективные и надежные системы управления.

В ходе эксплуатации оборудования осуществляется преобразование электрической энергии в механическую с определенным уровнем потерь, при этом возникает достаточно часто необходимость в регулировании производительности, давления, температуры и других параметров установки. Большая часть электроэнергии теряется в технологических установках основного и вспомогательных производств, где потери определяются в основном несовершенством технологических процессов, потерями в проточной части гидравлических машин и т.д.

Особый интерес представляет характер изменения КПД компрессоров и их приводов в связи с широким диапазоном изменения как степени повышения давления компрессора от расчетного до значений $\pi_k < 1$ (перед отключением компрессора и переходом на режим с естественной циркуляцией хладагента), так и производительности. Очевидно, что при каждом текущем значении температуры воздуха появляется зона возможных значений π_k , которая определяется характеристикой конденсатора (см. рис. 2). В этом случае появляется возможность

поиска оптимального значения π_k , которому будет соответствовать минимум эксплуатационных затрат в текущий момент времени.

Наличие внутреннего сжатия в винтовых компрессорах требует его согласования с внешней степенью сжатия при каждом текущем значении π_k , который устанавливается алгоритмом оптимального адаптивного управления. В этом случае используется комбинированное

регулирование (частотное регулирование + изменение геометрической степени сжатия V_f).

При использовании частотного регулирования в центробежных компрессорах часто появляются проблемы, обусловленные необходимостью согласования характеристики сети и характеристик компрессора, что также приводит к необходимости использования комбинированного регулирования (частотное регулирование + регулирование с помощью входного регулирующего аппарата или диффузора).

Оптимизация значения температур конденсации сводится к поиску таких значений расходов воздуха и (или) воды в конденсаторах различного исполнения, которые обеспечивают минимум суммарных эксплуатационных затрат (на компрессорное, конденсаторное оборудование и воздухоохладители). При использовании оребренных труб в испарительных конденсаторах появляется возможность работы в режиме «сухого конденсатора» с резким уменьшением π_k в осенне-весеннее и зимнее время года, обеспечивающих в отдельных случаях (при $\pi_k < 1$) переход на режим с естественной циркуляцией хладагента и отключением компрессорного оборудования.

При снижении числа оборотов гидравлических машин (при частотном регулировании) снижаются общие гидравлические потери в сети и исключаются дополнительные потери, обусловленные необходимостью введения регулятора расхода. Согласование характеристики сети и машины осуществляется при этом за счет изменения напорно-расходных характеристик машин. Указанное обстоятельство позволяет повысить уровень КПД машины при снижении производительности (см. рис. 3). При этом максимальные значения КПД незна-

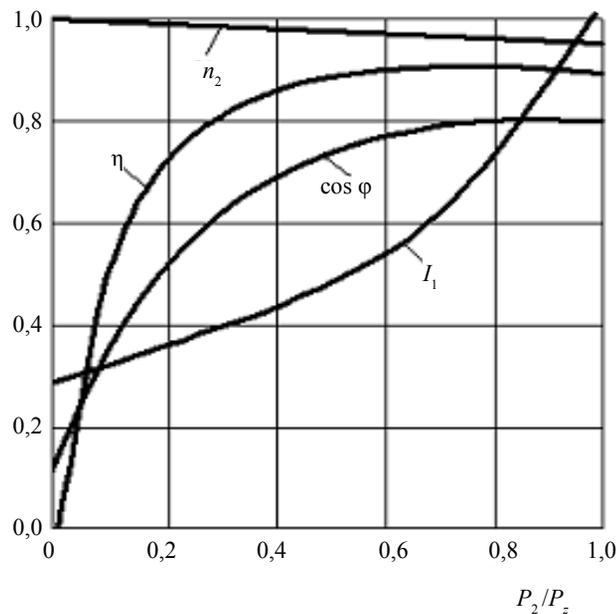


Рис. 1. Рабочие характеристики АД. Зависимости эксплуатационных параметров от мощности на валу (n_2, I_1, P_2 — отложены в относительных единицах)

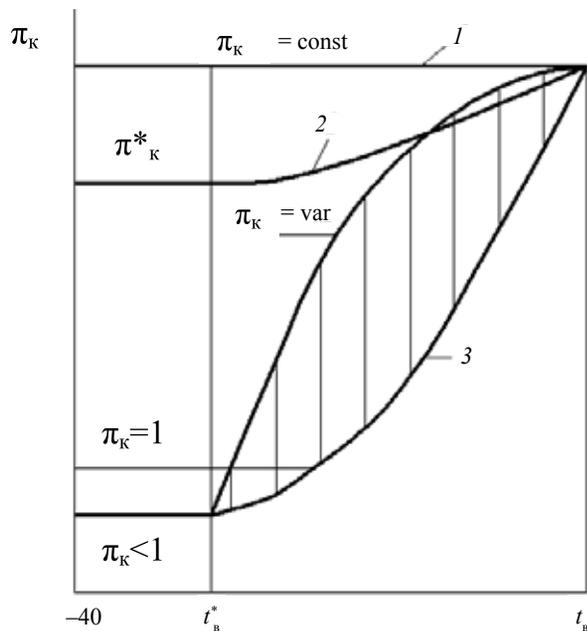


Рис. 2. Характеристики компрессора при переменных условиях работы: 1 — зависимость $\pi_k = f(t_b)$ при стабилизации давления конденсации хладагента, $\pi_k = \text{const}$ (общезаводская градирня); 2 — зависимость $\pi_k = f(t_b)$ при частичной стабилизации давления конденсации хладагента (автономная градирня); 3 — зависимость $\pi_k = f(t_b)$ при отказе от стабилизации давления конденсации хладагента. При $t_b \leq t_b^*$ возможен переход на режим с естественной циркуляцией хладагента

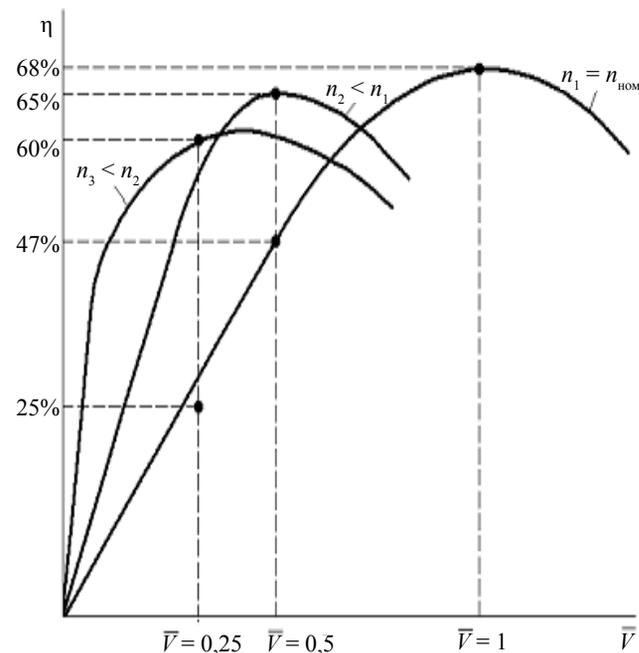


Рис. 3. Изменение КПД насосного агрегата при частотном регулировании. $V = V_{\text{ном}}$

чительно снижаются и смещаются в область малых расходов из-за рассогласования отдельных элементов проточной части машин.

Уменьшение степени повышения давления (напора) и производительности приведет к постоянному изменению рабочей точки и необходимости согласования характеристик сети и гидравлических машин. Снижение загрузки машин в этом случае приводит к снижению соответствующего значения коэффициента мощности (см. рис. 1) и КПД двигателей из-за увеличения реактивной мощности приводов. Решение проблемы повышения уровня КПД двигателей и повышения эффективности компенсаторов реактивной мощности двигателей позволит резко повысить эффективность эксплуатации оборудования при частичных нагрузках. Следует также отметить, что в холодильных установках при $\pi_k \rightarrow 1$ появляются проблемы, связанные с определением гидравлических и механических КПД компрессоров, в целом ряде случаев для винтовых компрессоров, например, информация отсутствует уже при $\pi_k \leq 2$.

В результате можно утверждать, что снижение уровня энергопотребления проектируемых и реконструируемых предприятий может быть достигнуто за счет следующих мероприятий:

Проектирования систем с использованием современного оборудования, оснащенного высокоэффективными средствами контроля, защиты и управления;

Проектирования комплексных теплохладоэнергетических систем на основе расчетных характеристик энергопотребления как в течение каждого технологического цикла, так и в процессе круглогодичной эксплуатации;

Использования на основе принципов «энерготехнологии» всех видов вторичных энергоресурсов;

Максимального использования естественного холода и методов аккумулирования холода и тепла [10, 11], что позволяет обеспечить пологость кривой потребности в электроэнергии;

Формирования автоматизированных локально-централизованных информационно-измерительных систем, которые могут быть использованы как в задачах оптимального адаптивного управления, так и в коммерческом учете электроэнергии.

Список литературы

1. Петров Е. Т. Особенности автоматизированного проектирования систем хладоснабжения предприятий большой мощности // Известия СПбГУНиПТ. 2004. № 1 (6). с. 20–26.
2. Лазарев И. А. Композиционное проектирование сложных агрегатированных систем. — М.: Радио и связь, 1986. 312 с.
3. Ньюшлос Дж., Рятин И. Я. Тенденции развития распределенной генерации. // Энергосбережение. 2012. № 7. с. 18–25.
4. Григорьев А. В. Малая энергетика в России (состояние и перспективы развития). // Электросистемы. 2006. № 4 (16).

5. Кривобок А. Д. Микротурбинные установки для автономных мини-ТЭС. // Электросистемы. 2006. № 4 (16). с. 7–11.
6. Справочник по электрическим машинам: В 2 т./Под общ. ред. И. П. Копылова, Б. К. Клокова. — М.: Энергоатомиздат, 1988.
7. Электродвигатели частотного регулирования. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://se33.ru/variable-frequecy.html>
8. Удо Леонард Тил, Майк Гриз. Регулируемый электропривод с синусоидальным фильтром. // Control Engineering Россия. 2006. № 2 (8).
9. Инструкция по расчету экономической эффективности применения частотно-регулируемого электропривода. Разработана АО ВНИИЭ и МЭИ. — Москва, 1997.
10. Бараненко А. В., Кириллов В. В., Бочкарев И. Н. Оптимизация свойств хладоносителей с помощью метода планирования эксперимента // Вестник Международной академии холода. 2007. № 4. С. 11–16.
11. Петров Е. Т., Тушев К. А. Особенности математической модели холодильной установки с льдогенератором периодического действия в системе аккумуляции холода. // Известия СПбГУНиПТ, 2004. № 1 (6), с. 17–19.

References

1. Petrov E. T. Features of computer-aided design of systems of cold supply of the enterprises of big power. *Izvestija SPbGUNIPT*. 2004. No 1 (6). p. 20–26. (in Russian)
2. Lazarev I. A. Composition design of the difficult aggregated systems. Moscow. Radio i svjaz', 1986. 312 p. (in Russian)
3. Njushloss Dzh., Rjapin I. Ja. Tendencies of development of the distributed generation. *Jenergoberezhenie*. 2012. No 7. p. 18–25. (in Russian)
4. Grigor'ev A. V. Small-scale power generation in Russia (a status and perspectives of development). *Elektrosistemy*. 2006. No 4 (16). (in Russian)
5. Krivobok A. D. Microturbine installations for independent mini-thermal power plants. *Elektrosistemy*, 2006. No 4 (16). (in Russian)
6. Kopylov I. P., Klokova B. K. The reference manual on electrical machines. Vol. 1, 2. — Moscow: Energoatomizdat, 1988. (in Russian)
7. Electromotors of the frequency regulation. [Electronic resource]: <http://se33.ru/variable-frequecy.html>. (in Russian)
8. Udo Leonard Til, Majk Griz. The adjustable electric drive with the sinusoidal filter. *Control Engineering Rossija*, 2006. No 2 (8).
9. Instruction on calculation of economic efficiency of use of the frequency and adjustable electric drive. It is developed VNIIE & MEI. Moscow, 1997. (in Russian)
10. Baranenko A. V., Kirillov V. V., Bochkarev I. N. Optimization of properties of coolants by means of an experiment planning method. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2007. No 4. p. 11–16. (in Russian)
11. Petrov E. T., Tushev K. A. Features of a mathematical model of the refrigeration unit with the ice generator of periodic action in system of accumulation of cold. *Izvestija SPbGUNIPT*, 2004. No 1 (6). p. 17–19. (in Russian)