

УДК 621.565

## Энергоэффективность и экологическая безопасность техники низких температур

**Ховалыг Д.М., Синицина К.М.,  
Бараненко А.В.** *baranenko@mail.ifmo.ru*

*Университет ИТМО  
Институт холода и биотехнологий  
191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9*

**Цой А.П.** *teniz@bk.ru*  
*Алматинский технологический университет, Республика Казахстан,  
050012, г. Алматы, ул. Толе би, д. 100 ;*

*Представлен анализ развития техники низких температур на современном этапе. Перспективе применения имеют волновые и линейные компрессоры, а также теплообменники с миниканалами. Применение последних обеспечит создание холодильных машин с ультранизкой заправкой холодильным агентом. Указано на целесообразность исследований по поиску новых эффективных хладоносителей. Получат распространение твердотельные охладители, а также холодильные системы, использующие возобновляемые и вторичные энергетические ресурсы. Дополнительную экономию энергии обеспечивает применение оптимальных холодильных технологий.*

**Ключевые слова:** компрессоры, миниканалы, испарители, конденсаторы, хладагенты, хладоносители, энергосбережение, абсорбционные машины, эффективное излучение, кондиционирование воздуха.

---

## Energy efficiency and ecological safety technicians of low temperatures

**Hovalig D.M., Sinitsyna K.M.**

*University ITMO  
Institute of Refrigeration and Biotechnologies  
9, Lomonosov Street, St Petersburg, 191002*

**Tsoi A.P.**  
*Almaty technological university, Republic of Kazakhstan,  
050012, Alma-Ata, Tola St. bu, 100;*

*The analysis of development of technology of low temperatures at the present stage is submitted. Wave and linear compressors, and also heat exchangers with minichannels have prospect of application. Application of the last will provide creation of refrigerators with ultralow filling with the refrigerating agent. It is specified expediency of researches on search of new effective hladonositel. Solid-state coolers, and also the refrigerating systems using renewable and secondary energy resources will gain distribution. The additional economy of energy is provided by application of optimum refrigerating technologies.*

**Keywords:** compressors, minichannels, evaporators, condensers, coolants, hladonositel, energy saving, absorbing cars, effective radiation, air conditioning.

Одними из основных тенденций развития мирового сообщества являются рост потребления энергоресурсов и увеличение народонаселения планеты. Оба этих фактора обуславливают постоянно увеличивающееся воздействие человеческой цивилизации на среду обитания. В связи с этим энергоэффективные технологии, рациональное природопользование, экологическая безопасность приобрели большую актуальность. Все это находит отражение в создаваемом оборудовании, технологических системах и в том числе в развитии техники низких температур. Последнее весьма важно, поскольку в энергобалансе стран с развитой экономикой доля электроэнергии, потребляемой холодильными системами, составляет более 15 %, в целом по мировому сообществу – порядка 13 % [1].

Энергетические показатели холодильных агрегатов повышаются совершенствованием основных элементов оборудования, к которым относятся компрессоры и теплообменные аппараты, применением современных средств регулирования и автоматизации [2,3,4].

Применяемые в настоящее время традиционные типы компрессоров в основном практически исчерпали ресурсы повышения эффективности. Развитие компрессоростроения пойдет по пути совершенствования отдельных узлов. В частности, в центробежных компрессорах смогут более широко применяться газовые подшипники, что позволит решить целый ряд эксплуатационных проблем [5, 6].

Новым для холодильной техники является применение волновых компрессоров [7, 8]. В них использованы технологии, пришедшие из реактивной авиации, основанные на теории волновых колебаний компримируемой среды при высоких скоростях. Пока волновые компрессоры позиционируются как альтернатива центробежным и осевым, имеющим большую производительность. Здесь возможно достижение эффекта как по энергетическим, так и по массогабаритным показателям.

В области малой производительности перспективны линейные поршневые компрессоры, которые динамически уравновешены, бесшумны и успешно применяются за рубежом в домашних холодильниках. В перспективе возможно их использование в коммерческом холоде.

В целом же, с позиции повышения энергоэффективности, ведущую роль будут играть разработка для компрессоров совершенных двигателей и систем регулирования. К ним относится, в частности, инверторное регулирование работы компрессора, обеспечивающее до 30 % экономии электроэнергии при работе компрессора в различных режимах.

Важным аспектом повышения экологической безопасности техники низких температур является реализация положений Монреальского и Киотского протоколов по вы-

воду из обращения хладагентов с высокими значениями потенциалов разрушения озонового слоя и глобального потепления. Решению данной проблемы также способствует сокращение заправки хладагента в систему.

Сокращение выбросов в атмосферу озоноразрушающих веществ позволило в определенной степени стабилизировать ситуацию с истощением озонового слоя Земли. В то же время глобальное потепление климата Земли в последние годы серьезно беспокоит мировое сообщество. В ТНТ в перспективе преимущественное использование должны получить природные хладагенты [9]. Однако они, по всей видимости, не смогут перекрыть весь диапазон мощностей и температур охлаждения, поэтому синтетические хладагенты также будут применяться. Для них Международный институт холода (МИХ) считает приемлемым потенциал глобального потепления не более 150. При этом должна быть обеспечена высокая энергетическая эффективность холодильных агрегатов. Следовательно, исследования по синтезу новых хладагентов с высокими термодинамическими характеристиками и низкими потенциалами разрушения озонового слоя и глобального потепления будут продолжаться. В этой связи большое значение имеет создание универсальных аналитических уравнений, позволяющих с большой достоверностью рассчитывать свойства хладагентов в широком диапазоне параметров [10].

В последние десятилетия активно развивается направление создания теплообменных аппаратов с миниканалами, с гидравлическим диаметром канала 0,5 – 1,0 мм [11]. Рядом фирм выпускаются миниканальные конденсаторы с воздушным охлаждением для фреоновых холодильных машин и кондиционеров. Применение таких конденсаторов позволяет уменьшить массу аппарата в 2-3 раза по сравнению с трубчаторебристыми, сократить заправку системы хладагентом на 20 %, повысить холодильный коэффициент агрегатов на 3-4 % [12]. Ведутся работы по созданию аммиачных конденсаторов с миниканалами, а также миниканальных испарителей. Применение последних аппаратов еще больше сократит удельную заправку системы хладагентом [13].

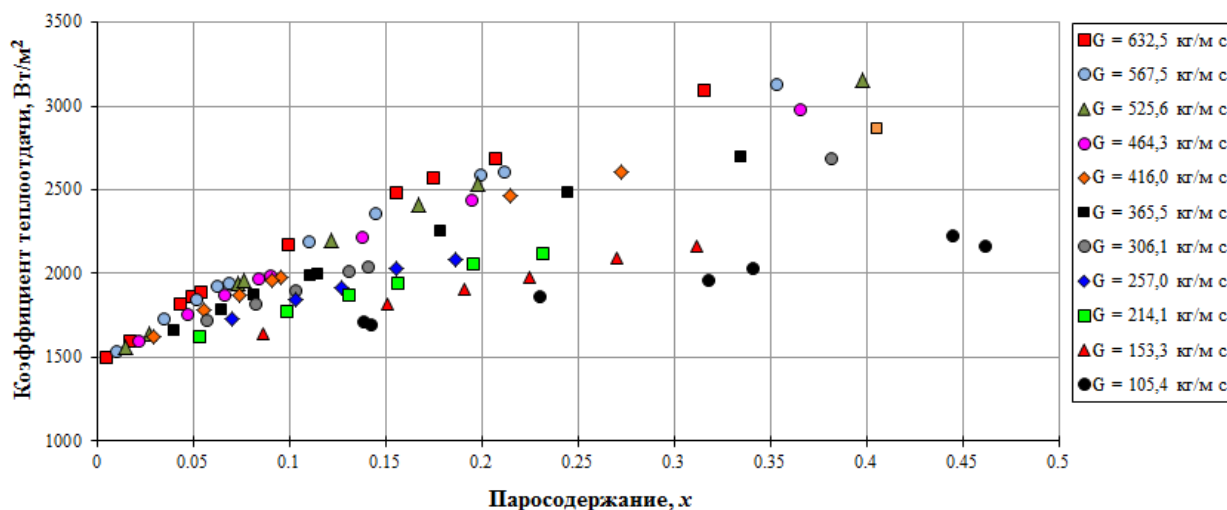
Сегодня уже существуют агрегаты, в которых заправка хладагента составляет 0,18 кг/кВт холодопроизводительности. По оценкам американских исследователей в случае применения миниканальных конденсаторов и испарителей, масса хладагента в системе может быть сокращена до 0,1 кг/кВт холодопроизводительности [14].

Миниканальные испарители для охлаждения жидких сред следует рассматривать, как следующее поколение известных пластинчатых. Вопрос сопоставления этих типов теплообменников до конца не изучен, хотя по данным американских ученых миникальные технологии позволят повысить теплопередачу до 20 % [15].

Задача создания миниканальных испарителей существенно сложнее по сравнению с конденсаторами. Для обеспечения устойчивой и эффективной работы испарителей требуют решения вопросы равномерного распределения хладагента по каналам, число которых может быть достаточно большим. Необходимо исключить реверс потока, значительные колебания температуры и градиента давления. На основании выполненных в ИХиБТ НИУ ИТМО и университете штата Иллинойс в Урбана-Шампейн (США) экспериментальных исследований динамики потоков и теплообмена при кипении R 134a в миниканалах гидравлическим диаметром 0,5 мм установлено следующее [16, 17, 18].

Эффективной областью эксплуатации миниканального испарителя является область массовых паросодержаний до 0,5. Коэффициент теплоотдачи растет до наступления высыхания стенок канала (рис. 1).

Неустойчивые процессы, наблюдаемые при малых массовых расходах (до 70 кг/(м<sup>2</sup>с)) и тепловых потоках порядка 10 кВт/ м<sup>2</sup>, вызывают резкие колебания расхода, давления в системе, температуры стенок каналов, а также приводят к обратному течению потока. В стационарном режиме работы возникшие колебания могут быть незатухающими. Проявление таких неустойчивых процессов опасно для эксплуатации миниканального теплообменника, так как они могут привести к значительным вибрациям в холодильной системе, к механической и термической усталости материала теплообменника, а также к снижению показателей по теплообмену.



**Рис. 1. Экспериментальные данные по определению коэффициента теплоотдачи при кипении R134a,  $D_h=538 \mu\text{m}$ ,  $t_{\text{нас}} = +29,4^\circ\text{C}$ ,  $q=2,2 \text{ кВт/м}^2$  [16].**

Для сокращения заправки хладагента в промышленных холодильных установках все большее распространение получают системы с вторичным контуром охлаждения.

Свойства хладоносителей оказывают заметное влияние на энергетическую эффек-

тивность таких систем. Все известные хладоносители обладают теми или иными недостатками. Выбор хладоносителя – всегда компромисс между его положительными и отрицательными качествами.

Разработка, поиск новых хладоносителей являются актуальной задачей для холодильной техники. В ИХиБТ НИУ ИТМО создан метод подбора хладоносителей с прогнозируемыми теплофизическими и физико-химическими свойствами, на основании которого предложен для применения ряд новых хладоносителей [19, 20, 21].

Будущее холодильной техники в значительной степени связано с твердотельными охлаждающими системами. Термоэлектрические охладители достаточно давно известны и применяются в бытовых холодильниках, системах кондиционирования и для решения специальных задач. Их широкое применение сдерживается невысокой энергетической эффективностью. Новые материалы с использованием нанотехнологий дадут возможность значительно улучшить энергетические характеристики термоэлектрических систем и расширить области их применения [22, 23, 24]. В последнее время активно ведутся фундаментальные и прикладные исследования по созданию охладителей на основе магнитокалорического и электрокалорического эффектов.

Немаловажным является то обстоятельство, что все твердотельные охладители обладают рядом преимуществ:

- удобство и простота эксплуатации, не требуется сервисное обслуживание;
- бесшумность;
- независимость от ориентации в пространстве;
- легкость и удобство дистанционного управления;
- возможность использования гибридных систем, когда в одном технологическом цикле изготавливаются и охладитель и функциональная электронная схема;
- экологическая чистота.

К энергоэффективным технологиям относится использование возобновляемых и вторичных энергетических ресурсов, а также охлаждающего эффекта эффективного излучения в небесную сферу в ночное время.

В 2008 г. ЕС отнес тепловые насосы (ТН) к системам, использующим возобновляемые источники энергии. Во многих странах были приняты документы, стимулирующие их применение. Это привело к развитию систем отопления на основе тепловых насосов и к увеличению их продаж. В странах ЕС установлено более 6 млн. ТН, мировые продажи составляют более 1 млн. штук в год [25, 26]. Создаются тепловые насосы большой единичной мощности, 20 и более МВт [27].

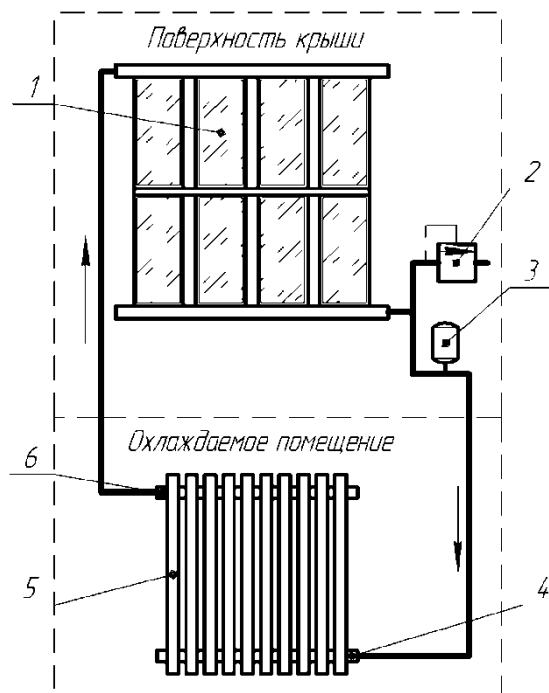
В Российской Федерации рынок ТН ещё не развит в достаточной мере. Необходимы более активная пропаганда преимуществ систем с ТН, а также меры стимулирования использования ТН.

Экономия энергии может обеспечить применение для целей хладотеплоснабжения абсорбционных бромистолитиевых преобразователей теплоты (АБПТ), работающих на вторичных энергетических ресурсах. Как известно, данные агрегаты работают, как правило, в области положительных температур кипения хладагента (воды) в качестве холодильной машины, а также в качестве понижающего или повышающего термотрансформатора [28]. Интенсификация тепломассопереноса в аппаратах, применение современных конструкционных материалов и эффективных ингибиторов коррозии позволяют создавать агрегаты с приемлемыми массогабаритными характеристиками и большим сроком службы [29, 30, 31]. Данный тип оборудования является экологически безопасным.

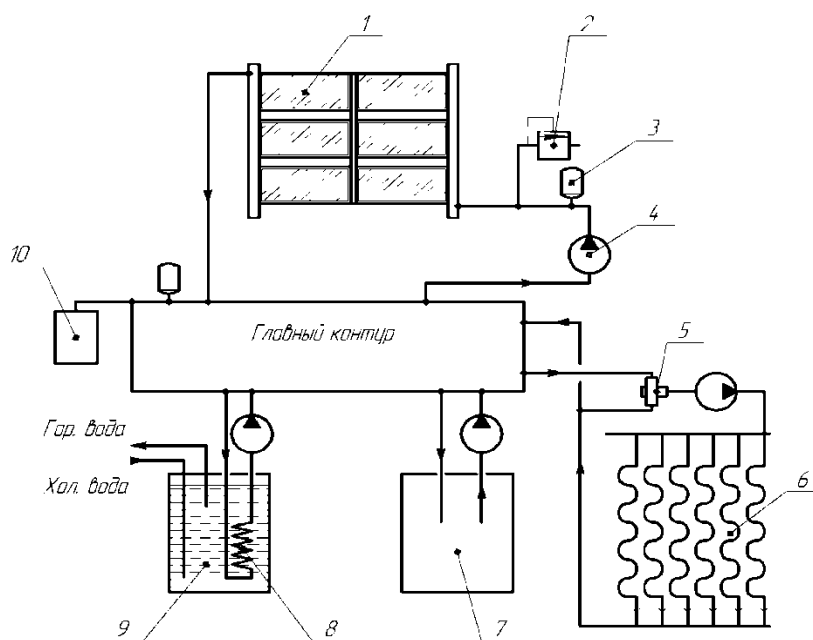
При использовании в испарителе АБПТ в качестве хладагента водного раствора бромистого лития определенной концентрации температура кипения может быть понижена ниже  $0^{\circ}\text{C}$  [32]. Широкая практическая реализация этого принципа расширит области применения АБПТ.

Этот вид техники требует к себе внимания с точки зрения научных исследований и организации выпуска на территории России агрегатов различной производительности, с возможностью использования различных греющих сред.

Эффективное излучение в небесную сферу может применяться в районах с континентальным климатом, для охлаждения аккумуляторов холода в ночное время. Лидером по применению подобной технологии являются США, где целый ряд фирм выпускает соответствующее оборудование для кондиционирования воздуха в зданиях. Созданы системы с циркуляцией хладоносителя за счет естественной конвекции (рис. 2) [33] и с принудительной циркуляцией хладоносителя (рис. 3) [34].



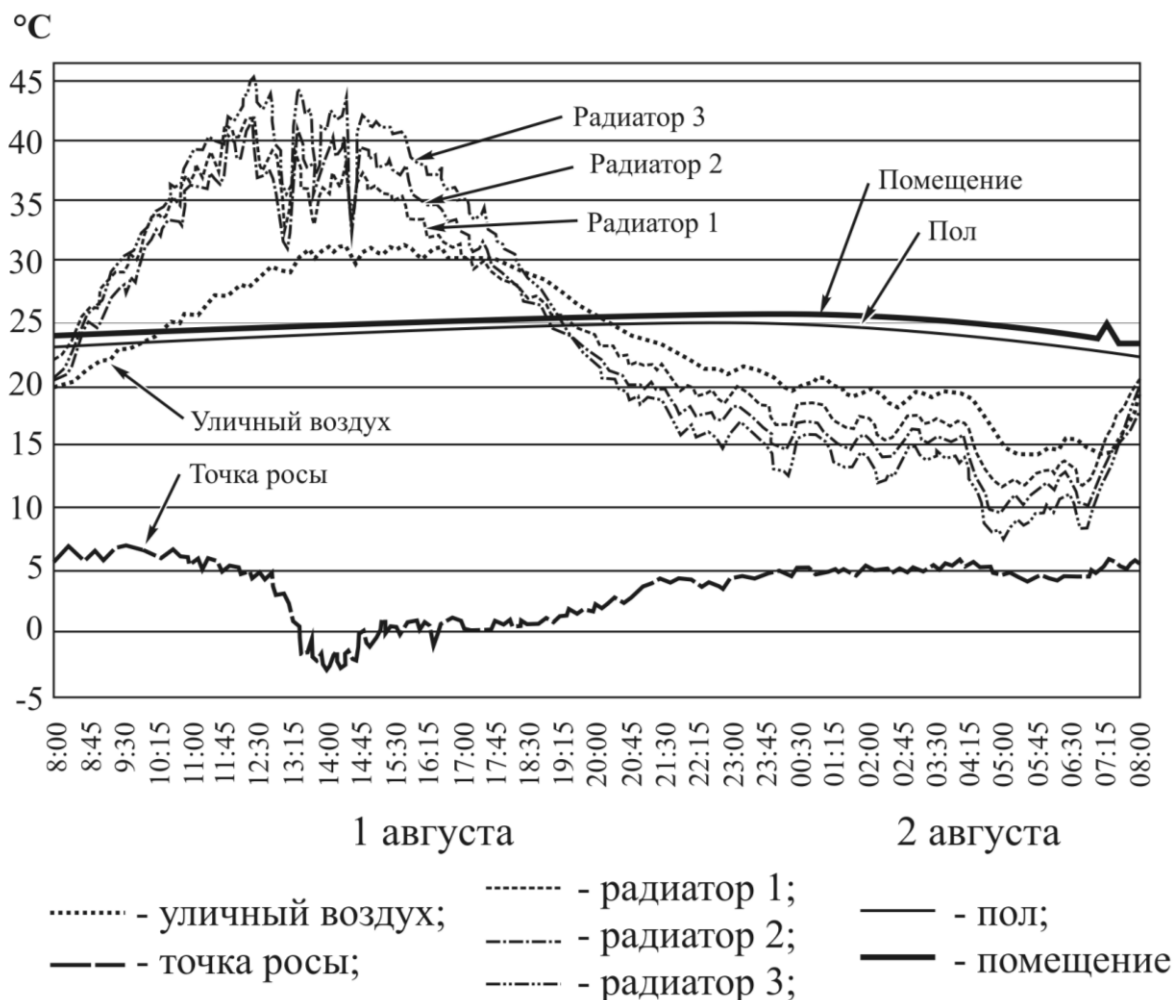
**Рис. 2. Система пассивного охлаждения производства ZomeworksInc.:**  
 1 – радиаторы; 2 – предохранительный клапан; 3 – расширительный бак; 4 – питающий трубопровод; 5 – трубы охлаждающей батареи; 6 – отводящий трубопровод



**Рис. 3. Схема холодильной системы с принудительной циркуляцией хладоносителя:**  
 1 – радиаторы; 2 – предохранительный клапан; 3 – расширительный бак; 4 – насосы;  
 5 – термостатический смесительный вентиль;  
 6 – трубопроводы в полах охлаждаемого помещения;  
 7 – газовый бойлер; 8 – теплообменник; 9 – бак-аккумулятор горячей воды;  
 10 – дренажный ресивер.

По данным испытаний в штате Нью-Мексико применение подобных систем позволяет сократить расход электроэнергии на кондиционирование на 30-90 %.

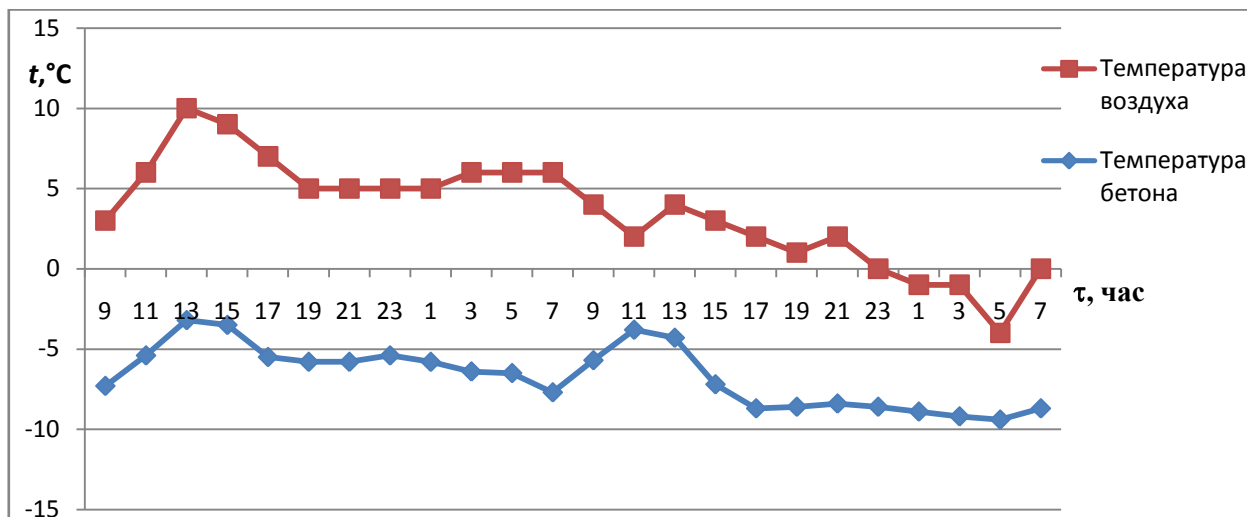
На рис. 4 приведен график, отображающий результаты работы системы в одном из жилых зданий.



**Рис. 4 Работа бытовой системы кондиционирования воздуха 1–2 августа.**

Исследования в Казахстане на катке Медеу показали, что за счет эффективного излучения разность температур воздуха и бетона ледового поля в среднем может составлять 10°C (рис.5) [35].





**Рис. 5. Температура бетона ледового поля и воздуха.**

Для промышленных холодильных систем экономию энергии обеспечивают применение современных методов автоматизации, эффективной изоляции охлаждаемых помещений, а также сокращение эксплуатационных теплопритоков, в которых большую долю составляют теплопритоки от охлаждения и замораживания пищевых продуктов .

Автоматизация холодильных установок в отдельных случаях сокращает расход потребляемой энергии до 40 %.

Обследования, выполненные в Европе, показали, что удельное энергопотребление на 1 м<sup>3</sup> объёма холодильных терминалов отличается в десятки раз.

По данным 295 складов в 21 стране удельное энергопотребление для холодильных складов находится в пределах от 4 до 250 кВт·ч/(м<sup>3</sup>·год), для морозильных складов – от 6 до 250 кВт·ч/(м<sup>3</sup>·год) и от 23 до 157 для комбинированных складов. Анализ показал, что осуществление энергосберегающих мероприятий позволит сократить удельное энергопотребление до 70 %, при этом срок окупаемости составит преимущественно от одного до трех лет [36].

Применение на холодильных складах рациональных температур хранения, охлаждения и замораживания может обеспечить экономию электроэнергии до 30 % [37, 38].

Системы кондиционирования – активно развивающийся инновационный сегмент инженерных систем зданий, сооружений и автономных объектов.

Объем российского рынка климатической техники, по данным Ассоциации предприятий индустрии климата, за последние десять лет увеличился более чем в 10 раз, ежегодно растет с темпом 12-15 % и, по оптимистическому сценарию, может достигнуть 30 %. Такой бурный рост связан с возрастанием требованием к качеству жизни, а также с ухудшением качества окружающей среды.

В общем случае, систему кондиционирования воздуха можно рассматривать как единый комплекс инженерных подсистем (вентиляции, отопления, охлаждения, и пр.), обеспечивающий поддержание требуемых параметров внутренней среды (помещения, группы помещений, здания) вне зависимости от внешних климатических условий с учетом архитектурно-строительных и теплофизических характеристик ограждающих конструкций.

В РФ системами жизнеобеспечения, включая микроклимат, потребляется порядка 40 % всей производимой электроэнергии. Поэтому энергоэффективность, сокращение энергопотребления для данной области также весьма актуальны [39].

МИХ сформулировал задачу снизить на 30 % удельное потребление энергии техникой низких температур к 2030 году. Устойчивое финансирование фундаментальных и прикладных научных исследований, а также опытно-конструкторских работ со стороны международных фондов, государств и крупных компаний, увеличение числа студентов по холодильному делу и повышение качества их подготовки позволят решить эту всеобъемлющую задачу.

#### Список литературы:

1. Бараненко А.В. Итоги работы МАХ за 20 лет. // Вестник Международной академии холода, 2013, № 2.
2. Мальшев А.А., Мамченко В.О. и др. Перспективные типы испарителей холодильных машин. // Вестник Международной академии холода, 2013, № 2.
3. Докукин В.Н., Пронин В.А. Влияние компримируемой среды на силовые факторы, действующие в винтовом маслозаполненном компрессоре. // Вестник Международной академии холода, 2013, № 2.
4. Бараненко А.В., Пекарев В.И. Фирма «Битцер» – производитель высокоэффективных холодильных компрессоров. // Холодильная техника, 2006, № 6.
5. Усков В.Н., Булат П.В. Об исследовании колебательного движения газового подвеса ротора турбохолодильных и детандерных машин. Часть 1. Постановка задачи. // Вестник Международной академии холода, 2012, № 3.
6. Усков В.Н., Булат П.В. Об исследовании колебательного движения газового подвеса ротора турбохолодильных и детандерных машин. Часть II. Колебания давления в соплах питающей системы на сверхкритическом режиме работы. // Вестник Международной академии холода, 2012, № 1.
7. Булат П.В., Усков В.Н. О задаче проектирования идеального диффузора для сжатия сверхзвукового потока. // Фундаментальные исследования, 2012, № 6, часть 1.

8. Булат П.В., Продан Н.В. Обоснование применения модели стационарной маховской конфигурации к расчету диска маха в сверхзвуковой струе. // *Фундаментальные исследования*, 2012, № 11, часть 1.
9. Цветков О.Б., Лантев Ю.А. Холодильные агенты без границ. // *Вестник Международной академии холода*, 2010, № 1.
10. Кудрявцева И.В., Рыков А.В., Рыков В. А., Рыков С.В. Единое неаналитическое уравнение состояния перфторпропана, удовлетворяющее масштабной теории критических явлений. // *Вестник Международной академии холода*, 2013, № 3.
11. Kandlikar S.G., Garimalla S., Li D., Colin S., King M.R. Heat Transfer and Fluid Flow in Minichannels and Microchannels.// Elsevier Limited, Oxford, 2006, p.450.
12. Johnson M., Hrnjak P. Investigation of Microchannel Heat Exchangers. // UIUC ACRC technical report, 2009.
13. Hrnjak P. Charge minimization in ammonia refrigeration system. // *Proceedings of IIR Conference on Ammonia Refrigeration System? Renewal and Improvement.*- Macedonia, 2005.
14. Padilla Fuentes Y., Hrnjak P. Experimentally validated microchannel heat exchanger Performance and charge predictions used to compare charge reduction potentials of some refrigerants. // 10<sup>th</sup> IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants. Delft, 2012.
15. Lee J., Mudawar I. Two-phase flow in high-heat-flux microchannel heat sink for refrigeration cooling applications: part II – heat transfer characteristics. // *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005. Vol. 48, 941-955.
16. Ховалыг Д.М., Бараненко А.В. Методы расчета градиента давления двухфазного потока при кипении в малых каналах. // *Вестник Международной академии холода*, 2012, № 1.
17. Ховалыг Д.М., Бараненко А.В. Теплоотдача при кипении хладагентов в малых каналах. // *Вестник Международной академии холода*, 2013, № 4.
18. Ховалыг Д.М., Бараненко А.В. Неустойчивости двухфазного течения веществ при кипении в микроканалах. // *Холодильная техника*, 2013, № 10.
19. Бараненко А.В. , Кириллов В.В., Сивачев А.Е. О выборе хладоносителя для систем косвенного охлаждения. // *Вестник Международной академии холода*, 2010, № 2.
20. Бараненко А.В. , Кириллов В.В., Бочкарев И.Н. Оптимизация свойств хладоносителей с помощью метода планирования эксперимента. // *Вестник Международной академии холода*, 2007, № 4.

21. Кириллов В.В., Костюков А.Ю., Чашикова В.В. Оценка весовых коэффициентов для расчета физико-химических параметров водно-пропилен-гликолиевого электролитного хладоносителя. // Вестник Международной академии холода, 2013, № 4.
22. Булат Л.П., Табачникова Н.Ю., Бублик В.Т., Каратаев В.В., Освенский В.Б., Пивоваров Г.И. Методы исследования механических свойств и структуры наноматериалов для термоэлектрических охладителей. // Вестник Международной академии холода, 2009, № 3.
23. Булат Л.П., Бочков Л.В. Наноструктуры на основе силицида магния – эффективные материалы для термоэлектрического преобразования энергии. // Вестник Международной академии холода, 2012, № 4.
24. Булат Л.П. Твердотельные охлаждающие системы. // Термоэлектричество. 2007, № 3.
25. Дзино А.А., Малышев А.А., Малинина О.С. Альтернативные рабочие вещества для комбинированного термотрансформатора. // Вестник Международной академии холода, 2013, № 3.
26. Бараненко А.В. Итоги работы МАХ за 20 лет. // Вестник Международной академии холода, 2013, № 2.
27. Сухих А.А., Антаненкова И.С. Термодинамическая эффективность теплонасосных установок. // Вестник Международной академии холода, 2013, № 1.
28. Бараненко А.В. и др. Абсорбционные преобразователи теплоты. – СПб: СПбГУ-НиПТ, 2005. – 338 с.
29. Бараненко А.В., Шевченко А.Л., Орехов И.И. Влияние поверхностно-активных веществ на тепломассообмен при пленочной абсорбции пара. // Холодильная техника, 1990, № 3.
30. Волкова О.В., Бараненко А.В., Тимофеевский Л.С. Исследование контактной и щелевой коррозии в водном растворе бромид лития. // Холодильная техника, 2001, № 5.
31. Бараненко А.В., Зюканов В.М., Шевченко А.Л. Повышение эффективности тепло-массообмена в абсорбере бромисто-литиевой холодильной машины. // Химическое и нефтегазовое машиностроение, 1990, №9.
32. Горшков В.Г., Мухин Д.Г., Дзино А.А. Получение низких температур кипения хладагента в абсорбционной бромистолитиевой холодильной машине. // Вестник Международной академии холода, 2013, № 4.
33. Stephen C. Baer & David C. Harrison. Temperature Control in Electronics. // Zome-works Corporation, – Albuquerque, 2008.

34. *Mark Chalom, Bristol Stickney*. Potentials of night sky radiation to save water and energy in the state of New Mexico // Governor Richardson's water innovation fund, – New Mexico, 2006.
35. *Цой А.П., Бараненко А.В., Эглит А.Я.* Использование эффективного излучения в холодильной системе открытого ледового катка. // Вестник Международной академии холода, 2012, № 4.
36. Совершенствование энергопотребления холодильных складов. // Холодильная техника, 2013, № 8.
37. *Эрлихман В.Н., Фатыхов Ю.А.* Выбор температурного режима работы морозильных аппаратов. // Вестник Международной академии холода, 2009, № 1.
38. *Эрлихман В.Н.* Снижение энергозатрат в процессах производства и хранения замороженных продуктов. // Вестник Международной академии холода, 2010, № 1.
39. *Цыганков А.В., Гримитлин А.М.* Состояние и перспективы развития систем кондиционирования воздуха. // Вестник Международной академии холода, 2013, № 4.