

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

АЛМАТИНСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ALMATY TECHNOLOGICAL UNIVERSITY

МЕЖДУНАРОДНАЯ АКАДЕМИЯ ХОЛОДА
INTERNATIONAL ACADEMY OF REFRIGERATION



**Х ЮБИЛЕЙНАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«КАЗАХСТАН-ХОЛОД 2020»**

**X ANNIVERSARY INTERNATIONAL SCIENTIFIC
AND TECHNICAL CONFERENCE
«KAZAKHSTAN-REFRIGERATION 2020»**

Сборник докладов конференции
4-5 марта 2020г.
Proceedings of the Conference
March 4-5 , 2020

Нур-Султан, 2020

УДК 621.56/59 (063)
ББК 31.392
К 14

Сборник подготовлен под редакцией
доктора технических наук, академика Кулажанова Т.К.

Редакционная коллегия:

Цой А.П., Радченко Н.И., Грановский А.С., Андреева В.И. (ответ. секретарь)

К 14 Казахстан-Холод 2020: Сб. докл. межд. науч-техн. конф. (4-5 марта 2020г.) =
Kazakhstan-Refrigeration 2020: Proceeding sof the Conference (March 4-5, 2020). –
Алматы: АТУ, 2020. –249 с., русский, английский

ISBN 978-601-263-529-4

На конференции при участии Министерства экологии, геологии и природных ресурсов Республики Казахстан обсуждалось стратегическое видение и поиск среднесрочных решений по применению экологически безопасных холодильных агентов и развитию «Зеленых» технологий переработки пищевых продуктов и холодильных технологий для Республики Казахстан.

В докладах из Казахстана, России, Украины, Германии, Бельгии, Дании, Японии, Южной Кореи, Италии представлены результаты научных исследований, посвященные экологически безопасным холодильным агентам, компрессорам, теплообменным аппаратам, компонентам, системам автоматизации, технологиям холодильного хранения и переработки пищевых продуктов. Сборник рассчитан на специалистов и ученых, работающих в областях холодильной техники, пищевой и нефтегазовой промышленности, а также на специалистов систем кондиционирования воздуха и жизнеобеспечения.

At the conference, the Ministry of Ecology, Geology and Natural Resources of the Republic of Kazakhstan jointly discussed the strategic vision and search for medium-term solutions for the use of environmentally friendly refrigerants and the development of "Green" food processing and refrigeration technologies for the Republic of Kazakhstan.

The reports from Kazakhstan, Russia, Ukraine, Germany, Belgium, Denmark, Japan, South Korea, Italy present the results of scientific research on environmentally friendly refrigerants, compressors, heat exchangers, components, automation systems, technologies for refrigerated storage and processing of food products and practical implementation. The Proceedings are intended for specialists and scientists working in the areas of refrigeration, food and oil and gas industries, as well as for specialists in air conditioning and life support systems.

УДК 621.56/59 (063)
ББК 31.392

ISBN 978-601-263-529-4

© АТУ, 2020

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Doroshenko A.V., Glauberman M.A. Alternative energy [Alternative energy]. Refrigerating and Heating Systems, [Odessa I.I. Mechnicow National University Press], 2012.
2. А.В. Дорошенко, М.А. Глауберман, В.Х. Кирилов, А.Р. Антонова, К.В. Людницкий Солнечные абсорбционные холодильные системы. Принцип построения и анализ возможностей / К.В. Людницкий, // Фізика аеродисперсних систем. – 2015. – №52. – С. 34-46.
3. Doroshenko A., Shestopalov K., Development of new schematic solutions and heat and mass transfer equipment for alternative solar liquid desiccant cooling systems, International Sorption Heat Pump Conference 2015, March 31 - April 2, 2015, Washington.
4. Foster R.E., Dijkstra E. Evaporative Air-Conditioning Fundamentals: Environmental and Economic Benefits World Wide. [Proc. Int. Conf. "Applications for Natural Refrigerants", Aarhus, Denmark, IIF/IIR, 1996, pp. 101-109 (In English).
5. Stoitchkov N. J., Dimirov G.J. Effectiveness of Crossflow Plate Heat Exchanger for Indirect Evaporative Cooling. Int. J. Refrig., vol. 21, no. 6, 1998, pp. 463-471.
6. Hasan A. Going below the wet-bulb temperature by indirect evaporative cooling: Analysis using a modifiede-NTU method. Applied Energy 89 (2012) 237–245.
7. Kabeel A., Abdelgaied M. Numerical and experimental investigation of a novel configuration of indirect evaporative cooler with internal baffles. Energy Conversion and Management 126 (2016) 526–536.
8. Chen Y., Yang H., Luo Y. Indirect evaporative cooler considering condensation from primary air: Model development and parameter analysis. Building and Environment 95 (2016) 330e345.
9. Chen Y., Yang H., Luo Y. Parameter sensitivity analysis and configuration optimization of indirect evaporative cooler (IEC) considering condensation. Applied Energy 2016.
10. Maisotsenko V., Lelland Gillan, M. 2003, The Maisotsenko Cycle for Air Desiccant Cooling. [Proc. 21st Int. Cong of Refrigeration IIR/IIF], 2003, Washington, D.C, ICR0646.
11. Denis Pandelidis, Sergey Anisimov, William M. Worec. Performance study of the Maisotsenko Cycle heat exchangers in different air-conditioning applications. Intern. Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, vol.81, pp. 207-221
12. Muhammad H., Muhammad S., Miyazaki T., Koyama S., Maisotsenko S. Overview of the Maisotsenko cycle—A way towards dew point evaporative cooling. Renewable and Sustainable Energy Reviews 66 (2016) 537–555.
13. Guangming CHEN, Aleksander DOROSHENKO, Kostyantyn SHESTOPALOV. Evaporative coolers of gases and liquids with a lowered level of cooling, 25th IIR International Congress of Refrigeration, Montreal, Canada, 2019
14. Doroshenko A.V., Antonova A.R., Khalak V.F., Goncharenko A.S. Low-Temperature Evaporative Air Coolers. Development and Analysis of Opportunities. PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE 3 (38) 2018
15. Дорошенко А.В., Горин А.Н., Тепломасообменные аппараты для традиционных и альтернативных энергетических систем. Донецк, Світ книги, 2013 – 327с.
16. Guangming Chena, Alexander Doroshenko, Kostyantyn Shestopalov. Solar Absorption Systems with Heat and Mass Transfer Apparatus with Fluidized Bed Packing, Analysis and Perspectives. 6th International Conference on Cryogenics and Refrigeration, April. 12-14, 2018, Shanghai, China. 413
17. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціювання [State Standard B.2.5-67:2013. Heating, ventilation and conditioning]. Ukraine, Minregion of Ukraine, 2014. 141 p.

УДК 621.51

INCREASING ENERGY EFFICIENCY OF COMPRESSORS

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПРЕССОРОВ

Budanov V.A. ^{1a} , Cand. Tech. Sc, associate professor Berkan I.V. ^{2b} , teacher-methodologist	Буданов В.А. ^{1a} , канд. тех. наук, доцент Беркань И.В. ^{2b} , преподаватель-методист
1 – Odessa national academy of food technologies Ukraine, 65039, Odessa, st. Kanatna, 112. 2 – Odessa Technical College Ukraine, 65089, Odessa, st. Balkovska, 54	1 – Одесская национальная академия пищевых технологий Украина, 65039, г. Одесса, ул. Канатная, 112. 2 – Одесский технический колледж Украина, 65089, г. Одесса, ул. Балковская, 54,
E-mail: a – budanoff@ukr.net; b – berkan.irina@gmail.com	

Abstract

The report provides an overview of different methods for improving the energy efficiency of compressors of various types, which are increasingly being used in HVAC equipment, the artificial cold

industry and heat pumps. Methods and designs are presented to reduce compressor energy consumption over a wide range of operating conditions.

Аннотация

В докладе дан обзор разных методов повышения энергоэффективности компрессоров различных типов, которые все шире используются в климатическом оборудовании, промышленности искусственного холода и тепловых насосах. Представлены способы и конструкции, позволяющие снизить потребление энергии компрессором в широком диапазоне эксплуатационных режимов.

На совещании сторон Монреальского протокола, состоявшемся в Кигали (Руанда), была принята так называемая Кигалийская поправка, добавляющая гидрофторуглероды (ГФУ) к списку веществ, вывод которых из обращения регулируется протоколом. Поправка предполагает, что к 2036 году развитые страны сократят производство и потребление ГФУ до 15% базового уровня 2011–2013 годов. ГФУ безопасны для стратосферного озона, однако обладают значительным потенциалом глобального потепления (ПГП). Так как поправку ратифицировали уже больше 20 сторон Монреальского протокола, она вступила в силу 1 января 2019 года.

В настоящее время не известно существование хладагента, обладающего низким ПГП, который был бы озонобезопасным, негорючим, высокоэффективным и мог использоваться во всех областях применения – от бытового кондиционирования до промышленного низкотемпературного охлаждения. В 2020 году вступят в силу следующие ограничения: запрет на хладагенты с показателем GWP свыше 2500 (R404A и R507) в стационарном холодильном оборудовании; новое оборудование должно использовать R407A, R32 или другие хладагенты; ограничен максимальный показатель GWP мобильных кондиционеров – не более 150.

Экологические факторы важны, но тем не менее ключевой момент при выборе хладагента это его энергоэффективность. Без максимальной энергоэффективности система все равно будет косвенно «осуществлять» дополнительный выброс углекислого газа за счет сжигания природных ресурсов в процессе генерации электроэнергии, необходимой для работы климатического и холодильного оборудования.

При оценке энергоэффективности нужно учитывать не только «сезонную эффективность», усредненную за сезон охлаждения или отопления, но и эффективность при пиковых нагрузках (в очень жаркие или очень холодные дни). Первый показатель важен для соответствия целевым показателям энергоэффективности различных европейских директив (Ecodesign, Energy efficiency directive, EPBD, Renewable Energy Source Directive), а эффективность при пиковых нагрузках позволит обходиться без привлечения резервных мощностей электростанций.

Поэтапная реализация в рамках Европейской комиссии (ЕК) мероприятий по повышению энергоэффективности и сокращения выбросов углекислого газа по всей Европе продолжена в рамках Директивы по экодизайну регламент ENER Lot21, которая вступила в силу с 1 января 2018 года [1]. Новые правила применяются в отношении продуктов воздушного отопления, продуктов охлаждения, высокотемпературных технологических чиллеров и фанкойлов.

ЕК работает над созданием общеевропейских правил для повышения энергоэффективности и оказания помощи потребителям за счет более прозрачных данных и более точных требований к отчетности для всех продуктов, связанных с энергетикой, включая охлаждение, обогрев и охлаждение помещений. В Директиве по экодизайну (2009/125/EC) поэтапное внедрение минимальных требований наряду с введением более реалистичного способа сравнения эффективности системы для энергетических и экологических показателей энергопотребляющих продуктов (energy-using products – EuP) и связанных с энергией продуктов (energy-related products – ErP)

Минимальные требования к эффективности, установленные для охлаждения кондиционеров в соответствии с новыми правилами, являются самыми высокими по сравнению теми, которые действовали с момента введения регламента ENER 10. Новые стандарты отражают стремление ЕК обеспечить реальное сокращение потребления энергии на европейском рынке путем стимулирования рынка к более энергоэффективным продуктам.

Минимальные требования выражены в первичной энергоэффективности, которая обозначается $\eta_{s,c}$ и $\eta_{s,h}$ (читается как «охлаждение $\eta_{s,c}$ » или «нагревание $\eta_{s,h}$ »). Эта мера основана на формуле, полученной из сезонного коэффициента энергоэффективности продукта (SEER) и сезонного коэффициента эффективности (SCOP).

Использование первичной эффективности в качестве показателя эффективности вытекает из ее первоначальной реализации в ЕС 813/2013 (LOT1/2), связанной с отоплением помещений. Обеспечивая согласованность, этот показатель позволяет легко сравнивать продукты с использованием разных источников энергии. Следует отметить, что регламент ENER 21 также

охватывает газовые обогреватели, и поэтому сочли целесообразным использовать первичную энергоэффективность.

Сезонная эффективность [2] применялась к системам кондиционирования и отопления, чтобы сравнить эффективность продуктов с номинальной эффективностью. Сезонная эффективность учитывает изменения температуры наружного воздуха, которые происходят в течение года, и количество раз, когда они происходят.

Для сравнения, номинальная эффективность, которая иногда используется до сих пор, оценивает эффективность системы на основе фиксированной температуры наружного воздуха 35 °C для охлаждения или 7 °C для отопления, которая не является репрезентативной при использовании в течение всего года эксплуатации. Таким образом, новый метод расчета обеспечивает гораздо более реалистичную оценку эффективности использования. Помимо потребления энергии «в процессе эксплуатации», сезонная эффективность также учитывает другие факторы, такие как режим «ожидания», режим «выключен» и потребление нагревателя картера. Это также способствует более реалистичному отображению производительности продукта.

Компрессор – основа любой холодильной установки, будь то кондиционер или тепловой насос, чиллер или оборудование из сферы торгового холода. Энергопотребление компрессора составляет около 90% мощности, потребляемой установкой в целом. Именно поэтому внимание производителей климатической и холодильной техники сосредоточено на технологиях энергосбережения компрессионного оборудования, а также на создании и продвижении новых видов компрессоров.

Повышение энергоэффективности компрессора можно достичь разными методами, а именно: совершенствование привода компрессора, улучшение его конструкции с целью снижения внутренних потерь и совершенствования рабочих процессов компрессора, а также применения современных систем управления компрессором и установкой в целом.

В начале 2000-х годов сначала в бытовых сплит-системах кондиционирования воздуха, а потом в полупромышленном и промышленном климатическом оборудовании стали внедряться инверторные приводы компрессоров. Они позволяли изменять холодопроизводительность агрегата в соответствии с реальной тепловой нагрузкой в помещении. Такой метод управления приводит к повышению холодильного коэффициента и увеличивает срок службы оборудования за счет резкого снижения количества циклов запуска и остановки компрессора. Первые инверторные приводы имели небольшую мощность, что сдерживало их распространение. Со временем были разработаны более мощные устройства, сфера их применения значительно расширилась.

Следующим шагом стала разработка инверторных приводов компрессоров, работающих от постоянного тока (DC Inverter – Direct Current Inverter). Суть нововведения – повышение энергоэффективности климатического оборудования за счет сокращения числа преобразований электрического тока. Регулирование работы компрессоров постоянного тока осуществляется путем изменения величины действующего напряжения. Питание компрессора осуществляется импульсами постоянной амплитуды, но разной частоты. Изменение длины и периодичности импульсов ведет к снижению действующего напряжения и соответствующему изменению производительности компрессора. Важно отметить, что при изменении действующего напряжения прямо пропорционально снижается потребляемая мощность компрессора, что обеспечивает экономию энергии при неполной нагрузке.

Рассмотрим современные конструкции компрессоров разных типов с точки зрения их энергоэффективности [3].

Конструктивно спиральные компрессоры состоят из электродвигателя, вала с эксцентриком и двух спиралей – подвижной и неподвижной. Подвижная спираль совершает поступательно-вращательное движение, благодаря которому обкатывается по поверхности неподвижной спирали. В каждый момент времени две спирали, касаясь друг друга, образуют несколько замкнутых объемов разной величины – тем больших, чем дальше они расположены от центра. По мере движения подвижной спирали полости смещаются к центру, уменьшаясь в объеме. Тем самым достигается сжатие хладагента.

Основное внимание производителей спиральных компрессоров приковано к профилированию спиралей, снижению перетечек, повышению срока службы элементов компрессора.

Для расширения температурных границ работы спиральных компрессоров была предложена технология Enhanced Vapor Injection (EVI). Суть ее заключается в подаче дополнительного потока хладагента в виде перегретого пара в процессе сжатия. Для этого часть жидкости после конденсатора направляют в небольшой теплообменник, где она выкипает и поступает обратно в компрессор.

В свою очередь, спиральные компрессоры помимо отверстий для подачи и нагнетания хладагента оснащаются специальным подводом для впрыскивания дополнительного объема хладагента. В спиральных компрессорах газ движется от наружных витков спиралей к внутренним. Впрыскивание дополнительного объема хладагента производится на середине этого пути. Технология EVI позволяет расширить температурные границы работы спиральных компрессоров в холодное время года до -25°C . Кроме того, по данным компании LG, за счет применения промежуточного впрыска хладагента удастся повысить производительность установки на 27%. Технология EVI способствует понижению температуры нагнетания компрессора, что, в свою очередь, позволяет компрессору работать с более высокой частотой вращения, а это приводит к увеличению производительности агрегата. Технология EVI применяется также в компрессорах Copeland, Mitsubishi Electric и других.

В спиральных компрессорах новых кондиционеров компании Daikin применен конструктивный элемент, служащий для уменьшения перетечек хладагента из зоны с высоким давлением в зону с более низким давлением. Чтобы избежать этих перетечек, подвижная и неподвижная спирали должны быть плотно прижаты друг к другу. Для уменьшения перетечек в новом компрессоре серии K предусмотрен специальный подвод, пропускающий хладагент с линии нагнетания в специальную полость, где он своим давлением действует на дополнительную опорную площадку подвижной спирали, таким образом компенсирует недостаток прижимной силы. Подвод работает так, что чем больше скорость вращения ротора компрессора, тем меньше хладагента попадает в компенсационную полость и наоборот, то есть прижимная сила практически всегда остается постоянной, независимо от загрузки компрессора.

Уменьшение перетечек в режиме низкой загрузки заметно увеличивает коэффициент сезонной эффективности, измерения показывают прибавку на 3,2 пункта APF (японский аналог SEER) по сравнению с системами, использующими компрессоры предыдущего поколения серии J. Тестирование по регламенту ENER Lot21 показало, что по сравнению с предыдущей серией сезонная эффективность повысилась в среднем на 23%.

Передовой инжекционный компрессор седьмого поколения серии K в VRV IV C+ отличается усовершенствованной конструкцией и создан для улучшения производительности при сниженной нагрузке. Он оснащён дополнительным инжекционным подводом с обратным регулирующим клапаном, через который в цикле с промежуточной нагрузкой компрессора в камеру сжатия впрыскивается дополнительная порция паров хладагента, выходящая из конденсатора через дополнительный пластинчатый теплообменник и электронно-расширительный клапан (ЭРВ), для создания эффекта двухступенчатого сжатия.

Это не допускает снижения мощности при низких температурах, и процесс происходит без падения производительности (до -15°C), что является лучшим показателем в отрасли. В системе предыдущего поколения использовался каскадный цикл с двумя холодильными контурами в разных корпусах, а внешние блоки нельзя было комбинировать. В VRV IV C+ впервые используется однокаскадная схема в одном корпусе, реализованная на одном хладагенте R410A.

В режиме нагрева в дополнительном пластинчатом теплообменнике в контуре нагнетания происходит кипение и подогрев инжектируемого в камеру сжатия хладагента, а в режиме охлаждения сконденсированный хладагент дополнительно охлаждается, что способствует повышению эффективности холодильного цикла. Теплопередача в пластинчатом теплообменнике на 20% выше, чем в стандартном теплообменнике «труба в трубе». Обе технологии инжекционного впрыска хладагента в компрессор и байпасирования хладагента повышают на 23% сезонную эффективность VRV IV C+.

К новшествам в поршневых компрессорах относится применение клапанов в форме шайбы вместо традиционных лепестковых клапанов. Новая конструкция позволяет существенно снизить величину «мертвого» объема компрессора. Клапаны в форме шайбы предусмотрены, например, на новых поршневых компрессорах линейки Discus от компании Copeland.

Модификацию клапанных досок в поршневых компрессорах провела и компания Bitzer. Эта линейка компрессоров получила название Ecoline. По данным производителя, холодильный коэффициент агрегатов был увеличен на 12% по сравнению с прошлыми сериями за счет новых клапанных досок, высокоэффективных моторов, а также новой конструкции головки цилиндров, снижающей потери от пульсации газа на стороне нагнетания. Для компрессоров Bitzer Ecoline применяются адаптированные преобразователи частоты Varipack.

Среди винтовых компрессоров наибольшее распространение получила конструкция с двумя винтами. Для дальнейшего повышения их энергоэффективности при частичной загрузке винтовые

компрессоры оснащают частотными приводами. Кроме того, проводятся исследования по оптимизации различных узлов винтовых компрессоров.

Так, в компании Bitzer особое внимание уделяют профилю роторов, работе подшипников, устройству золотниковых клапанов. От качества прилегания роторов зависит величина перетечек между полостями с высоким и низким давлением. При появлении зазоров перетечки возрастают, при слишком плотном прилегании возможны задиры и заклинивание роторов, что приведет к поломке компрессора. Необходимо обеспечить надежное разделение винтовых поверхностей слоем смазки или применить материалы с высокой износостойкостью и низкой склонностью к схватыванию.

Для регулирования холодопроизводительности используются технологии двухступенчатого регулирования за счет смещения точки всасывания. Это позволяет обеспечивать режим работы с 75%-ной и 50%-ной холодопроизводительностью. Кроме того, в компрессорах Bitzer применяется регулирующий поршень, обеспечивающий плавный пуск компрессора и его работу с пониженной производительностью.

По сути, речь идет о регулировании производительности за счет изменения объемного отношения, которое определяется отношением объема всасывания к объему нагнетания. Объемное отношение определяется конструкцией компрессора и является постоянной величиной для каждой модели. В новых компрессорах изменение объемного отношения производят за счет увеличения объема полости нагнетания при том же объеме полости всасывания. Уменьшение объемного отношения приводит к снижению коэффициента сжатия, а значит, к снижению холодопроизводительности системы и нагрузке на компрессор.

Турбокомпрессоры – это относительно новый вид компрессоров, который появился на климатическом рынке около 10 лет назад, а активное распространение получил лишь в последние несколько лет. Они характеризуются малым объемом рабочей полости и компактными размерами, но высокой скоростью вращения вала – до 40000 оборотов в минуту. Подшипники качения неспособны эффективно и надежно работать на таких скоростях. В турбокомпрессорах применяются газовые подшипники, а в современных моделях используется магнитная подвеска. В этом случае наличие зазоров в подшипниках обеспечивается за счет магнитных подшипников – двух радиальных (переднего и заднего) и одного осевого. Для обеспечения надежности магнитной подвески в компрессорах предусмотрена система контроля положения вала. В зависимости от зазоров между валом и подшипниками формируется корректирующее магнитное поле, поддерживающее вал в оптимальном положении. Учитывая высокую скорость вращения вала компрессора, проверки положения вала происходят около 100 тысяч раз в секунду. При отсутствии электропитания ротор остается в равновесии и поддерживается с помощью специальных карбоновых подшипников.

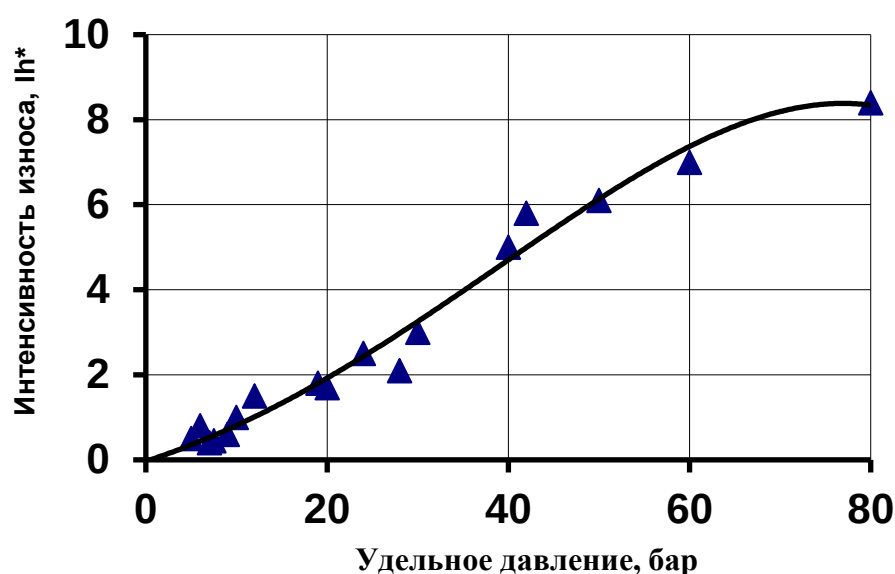
Отсутствие трущихся частей в компрессоре способствует повышению его КПД. Кроме того, отсутствие масла позволяет обойтись без подогревателей масла, масляных насосов, маслоотделителя, масляного фильтра и других элементов. Так как в холодильном контуре хладагент циркулирует в чистом виде без каких-либо примесей, в конденсаторе и испарителе не образуется масляная пленка, снижающая эффективность теплообмена.

Значительное повышение скорости вращения вала позволило существенно снизить габариты и массу компрессора. В среднем турбокомпрессоры в 5–9 раз компактнее и легче компрессоров другого типа с аналогичной производительностью. Помимо снижения затрат на изготовление корпуса компрессора сокращаются вес и габариты чиллеров и наружных блоков, соответственно, упрощаются транспортировка и монтаж.

Учитывая вышеизложенное можно отметить, что в конструкции компрессоров все же остается достаточно трущихся сопрягаемых деталей, которые могут иметь непосредственный контакт и как следствие износ и увеличение рабочих зазоров. Изнашивание цилиндропоршневой группы, подшипников вала, а так же торцевых и рабочих поверхностей спиралей и винтов приводит к увеличению протечек из камеры сжатия, что в свою очередь снижает массовую производительность компрессора. Изучению трения и износа различных деталей холодильных компрессоров были посвящены множество исследований, в частности [4]. В данной работе приведено аналитическое выражение для определения интенсивности износа деталей компрессора, основанное на комплексах, отражающих природу и механику фрикционного контакта:

$$I_h = p_a^x \left(\frac{1}{\Theta} \right)^y \left(\frac{h}{\sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}} \right)^z \left(\frac{\xi_1 p_a}{\sigma_0} \right)^\gamma \left(\frac{R_{\max}}{rb^{1/\nu}} \right)^\nu$$

В данном выражении первые два множителя описывают физико-механические свойства материала и удельное давление в паре трения. Третий множитель учитывает геометрию трущихся поверхностей и наличие масляного слоя. Четвертый множитель учитывает усталостную природу изнашивания деталей сопряжения, а пятый определяет площадь контакта трущихся поверхностей. Для оценки влияния различных параметров на интенсивность изнашивания деталей были проведены испытания компрессоров на специальном стенде в широком диапазоне удельных давлений в парах трения. Кроме того, варьировалась продолжительность их работы в переходных режимах (изменяли частоту циклов пуск-остановка). Также исследовали влияние на характер износа деталей при циклической работе компрессора изменения направления вращения вала, т.е. реверсирования механизма движения. В результате экспериментальных исследований были определены скорости изнашивания в период приработки и установившегося износа, что позволило определить значения величин и показателей степени, входящих в аналитическое выражение. С помощью данного выражения была рассчитана интенсивность изнашивания деталей компрессоров при их работе в широком диапазоне рабочих режимов. Результаты расчета и экспериментальные данные представлены на рисунке (см. ниже).



▲ — экспериментальные значения

* — для получения числового значения I_h использовать множитель 10^{-13}

Как видно из рисунка расчетные и экспериментальные данные имеют удовлетворительную сходимость. Разработанная методика расчета интенсивности изнашивания позволяет рассчитывать их ресурс и прогнозировать долговечность в различных условиях эксплуатации на стадии проектирования новых моделей компрессоров. Кроме того, использование аналитического выражения в алгоритме управления компрессором позволит оценить и учесть вредное влияние увеличения зазоров в сопряжениях на производительность компрессора, а также прогнозировать его ресурс.

Высокая энергоэффективность климатического и холодильного оборудования во многом будет определяться совершенством основной составляющей — компрессора. Тут на помощь придут как новые цифровые технологии, достижения материаловедения, альтернативные рабочие тела, так и использование результатов теоретических и экспериментальных исследований минувших лет для получения новых качеств и продуктов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Products covered and their status in the ErP process [Электронный ресурс] –2019. – Режим доступа: <http://www.eceee.org/ecodesign/>
2. Daikin leads the way in seasonal efficiency [Электронный ресурс] –2019. – Режим доступа:// <https://www.daikin-ce.com>
3. Сводка новостей eJARN.com [Электронный ресурс] –2019. – Режим доступа: <http://www.ejarn.com>.
4. Буданов В.А. Влияние условий эксплуатации герметичных холодильных компрессоров на триботехнические характеристики их деталей /Милованов В.И., Буданов В.А., Смирнов Ю.А., Никитина Л.А. // Холодильная техника. Москва, 1990. – №10. – С.18-22.

Авторский алфавитный указатель

- Akimov M.M., Tussipov N.O., Alieva M.A., Davydova S.G., Kim I.A.**
Research of the resistance of the dried material in the fluidized bed depending on the speed of the drying agent
Акимов М.М., Тусипов Н.О., Алиева М.А., Давыдова С.Г., Ким И.А.
Исследование сопротивления высушиваемого материала в кипящем слое в зависимости от скорости сушильного агента 7
- Alekseev G.V., Voronenko B.A., Egorova O.A., Leu A.G.**
Heat and mass transfer modeling during storage of food raw materials mounds in conditions of active ventilation
Алексеев Г.В., Вороненко Б.А., Егорова О.А., Леу А.Г.
Моделирование тепло - и массопереноса при хранении насыпей пищевого сырья в условиях активного вентилирования 10
- Amiaga J. V.^{1a}, Vologzhanina S. A.^{2b}**
Features of relief obtaining on the surface of steel parts using a 50 w laser
Амяга Д. В.^{1а} Вологжанина С. А.^{2б}
Особенности получения рельефа на поверхности стальных изделий с помощью лазера мощностью 50 Вт 15
- Parimbekov Z., Aldazhumanov Z., Telmanov M.A.,**
Research of the intensity of processes of freezing products based on meat raw materials
Паримбеков З.А.^а, Алдажуманов Ж.К., Тельманов М. А.
Исследование интенсивности процессов замораживания продуктов на основе мясного сырья 22
- Doroshenko A.V., Khalak V.F., Antonova A.R.**
Solar-radiation-based multifunctional absorption systems of refrigeration and air conditioning. Developments and analysis of opportunities.
Дорошенко А.В., Халак В.Ф., Антонова А.Р.
Солнечные многофункциональные абсорбционные системы хладоснабжения и кондиционирования воздуха. Разработка и анализ возможностей 25
- Boshkova I. L., Volgusheva N.V., Potapov M.D.**
Magnetrons cooling system modernization
Бошкова И.Л., Волгушева Н.В., Потапов М. Д.
Модернизация системы охлаждения магнетронов 34
- Baibassarova A.R., Zhumabekov A.S., Stepanova O.A., Yermolenko M.V., Parimbekov Z.A.**
The influence of component composition on the thermophysical characteristics of food products
Байбасарова А.Р., Жумабеков А.С., Степанова О.А., Ермоленко М.В., Паримбеков З.А.
К вопросу влияния компонентного состава на теплофизические характеристики пищевых продуктов 38
- Doroshenko A.V., Kovalenko C.A., Antonova A.R.**
Solar absorption air conditioning systems based on low temperature evaporative air coolers
Дорошенко А.В., Коваленко С.А., Антонова А.Р.
Солнечные абсорбционные системы кондиционирования воздуха на основе низкотемпературных испарительных воздухоохладителей 40
- Budanov V.A., Berkan I.V.**
Increasing energy efficiency of compressors
Буданов В.А., Беркань И.В.
Повышение энергоэффективности компрессоров 49