

**ОБЗОР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГАЗОВЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН
В УМЕРЕННОМ ТЕМПЕРАТУРНОМ ДИАПАЗОНЕ**

Актуальность и постановка задачи. Широкое использование парокompрессионного цикла в умеренном температурном диапазоне требует учёта ограничений на использование фреонов (Монреальский и Киотский протоколы) и повышения энергетической эффективности циклов. Поэтому появились альтернативные направления развития холодильной техники: термоэлектричество; газовые холодильные машины (ГХМ); магнитное охлаждение; адсорбционное охлаждение и т.д.

Развитие направления связанного с ГХМ имеет ряд преимуществ. Во-первых, эти устройства обладают высокой термодинамической эффективностью (теоретическая эффективность циклов Стирлинга и Карно совпадают). В настоящее время уже существуют устройства, которые работают по обратному циклу Стирлинга, не уступающие по эффективности парокompрессионным холодильным машинам (ПХМ) [1]. Во-вторых, рабочие тела этих устройств экологически безопасны (гелий, водород, воздух и т.д.). В-третьих, имеется большой опыт расчёта и проектирования этих устройств на криогенный температурный уровень.

В работе [2] был составлен рейтинг технологий по пяти критериям: уровень развития технологии, сложность конструкций, компактность и масса, эксплуатационные расходы, эффективность. ГХМ Стирлинга и низкотемпературные охладители на пульсационной трубке (НОПТ) имеют наиболее высокий потенциал для использования в умеренном температурном диапазоне по сравнению с другими альтернативными технологиями получения холода. Первую позицию в этом рейтинге заняли парокompрессионные холодильные машины.

Несмотря на высокие позиции в этом рейтинге, авторы отвергли возможность использования ГХМ в умеренном температурном диапазоне. Но в работе [3] полагают, что необходимы дополнительные исследования, чтобы однозначно дать ответ о применении этих устройств в холодильной технике.

О перспективности этого направления, также говорит и то, что интерес к нему проявляют ряд крупнейших коммерческих организаций мира [1]: Global Cooling B. V., LG Electronics, Stirling Power System, Sunpower Inc., General Electric и т.д.

Актуальной задачей является расчёт и оптимизация ГХМ. В этих устройствах протекают сложные нестационарные процессы. Для описания этих процессов и расчёта интегральных характеристик нужны адекватные математические модели. Их использование позволяет ускорить процесс проектирования машин и сократить материальные затраты на эксперименты. В настоящее время наиболее актуальны одномерные математические модели [4]. Во-первых, для их применения не требуется специальная вычислительная техника, в отличие от многомерных моделей. Во-вторых, они достаточно подробно описывают процессы, протекающие в элементах ГХМ. Каждая из этих моделей имеет свои характеристики и свойства. Следовательно, их применение определяется целями исследования.

Задачей этого исследования является, во-первых, изучение особенностей применения ГХМ в умеренном температурном диапазоне, во-вторых, анализ существующих математических моделей и программ для расчёта этих устройств.

ГХМ на умеренный холод. Первое исследование ГХМ на умеренный холод было проведено Финкльштейном и Полонски в 1959 году [5]. Результаты, полученные в ходе этого исследования, показали, что ГХМ Стирлинга может достигать близких или лучших показателей, чем ПХМ. В качестве рабочего тела использовался воздух. После длительного перерыва в 1990 году исследования возобновились. Компания General Electric получила заказ от Sunpower Inc. на разработку охладителя Стирлинга, что стало новым этапом развития ГХМ для получения холода в умеренном температурном диапазоне [6].

В работе [7] выделяются следующие достоинства этих машин: высокая эффективность при малых значениях холодопроизводительности, сохранение эффективности в широком диапазоне изменения внешних условий работы (температуры окружающей среды, температуры охлаждения и т.д.). Также эти устройства обладают массой, не превышающей массу ПХМ [6].

Компактность и возможность сохранять высокий КПД даже при нагрузках порядка 5 Вт позволяет им конкурировать с термоэлектрическими устройствами охлаждения в умеренном температурном диапазоне. Эта особенность позволяет использовать эти устройства в комбинации с солнечными батареями [8].

В связи с тем, что доминируют на рынке ПХМ, были выявлены их основные отличия от ГХМ.

Во-первых, газовые холодильные машины, в отличие от парокompрессионных работают непрерывно. В этом режиме работы отсутствуют следующие потери [9]: средняя температура конденсации выше, а средняя температура кипения ниже по сравнению с непрерывно работающим охладителем при заданной нагрузке; потери пуска/остановки.

Во-вторых, непрерывная работа уменьшает тепловую нагрузку на теплообменную аппаратуру [10].

В-третьих, хладагент ПХМ, как правило, является средой, с помощью которой отводится тепло от охлаждаемого объекта, а для ГХМ необходимы дополнительные способы переноса холода к этому объ-

екту [11]: вторична среда, перекачиваемая насосом; вентиляторы; термосифоны. Это обусловлено тем, что газовая холодильная машина должна иметь малый мертвый объем, что накладывает ограничение на размеры теплообменников устройства, что в свою очередь не позволяет разместить их непосредственно в холодильной или морозильной камере. С другой стороны, на крупных промышленных и торговых объектах ПХМ охлаждает, как правило, вторичную рабочую среду (система чилер-фанкойл). В этих системах можно говорить о непосредственной замене парокompрессионной машины на газовую.

Еще одно преимущество ГХМ является то, что холодопроизводительность и температура в камере регулируются изменением мощности привода [12].

В [13] отмечается, что при температурах ниже -30°C эффективность ГХМ значительно выше, чем у ПХМ. Использование парокompрессионного цикла при этих температурах осложнено необходимостью применения многоступенчатого компрессора, что существенно повышает стоимость этих установок [7]. Поэтому при этих температурах предпочтительнее использовать газовую машину. Хранение и заморозка продуктов при температурах ниже -30°C позволяет дольше хранить продукты и сохранять их качество.

Также, в умеренном температурном диапазоне можно использовать НОПТ. Его главным преимуществом является компактность, малая масса, простота конструкции. Охладитель имеет большой потенциал быть использованным в этом диапазоне температур. Но из-за более низкой термодинамической эффективности, по сравнению с циклом Стирлинга, требуются исследования для повышения его эффективности.

Еще одна область применения ГХМ – это тепловые насосы. Важность их использования отмечается в условиях Украины отмечено в [14].

Все эти охладители имеют высокую цену на рынке. Но при увеличении объема выпуска единиц бытовых холодильников с 10 тыс. единиц в год до 25 тыс., цена может упасть с 336 дол. за единицу до 86 дол. [15].

Таким образом, ГХМ это устройства, которые на данный момент, как минимум, не уступают в эффективности ПХМ. Дальнейшее повышение их КПД, снижение цены за счет серийного производства и совершенствования конструкций в будущем может позволить им составить конкуренцию ПХМ.

Методы анализа рабочего процесса ГХМ и результаты расчета. Для моделирования ГХМ существует большое количество математических моделей. Все они отличаются по степени приближения к реальному процессу.

В настоящее время наиболее актуальным методом анализа характеристик ГХМ является многомерное моделирование [4]. Этот подход, по сравнению с другими, позволяет получить большой объем информации о процессах, протекающих в машинах. Также появляется возможность исследования влияния некоторых конструктивных особенностей ГХМ. Но их широкое применение ограничивается возможностями современной вычислительной техники. Например, оптимизация этих устройств с использованием многомерных моделей требует значительного количества расчетного времени. Поэтому поиск оптимальных параметров и режимов работы устройств проводится по одномерным математическим моделям, а с помощью многомерного моделирования и эксперимента проводится верификация расчетов.

Следовательно, анализ на основе одномерных математических моделей является актуальным. Точность и качество расчета параметров машин для этих моделей зависит от качества эмпирических соотношений, использованных в них (коэффициент теплоотдачи, коэффициент сопротивления и т.д.).

Большой опыт математического моделирования и экспериментального исследования ГХМ позволяет создавать новые качественные математические модели и создавать программы, объединяющие ранее созданные модели.

Наиболее современные программы расчета параметров ГХМ – это DeltaE, Sage, REGEN 3.2, ARCOPTR [4].

Программа ARCOPTR позволяет быстро и легко оценивать параметры НОПТ. Но она ограничена одним классом устройств.

REGEN 3.2 – пакет для качественной и точной оценки характеристик регенераторов. Среди недостатков можно выделить то, что выбор рабочего тела ограничен гелием и исследовать можно только один структурный элемент ГХМ.

DeltaE позволяет исследовать большой класс устройств. Но этот пакет, в первую очередь, ориентирован на расчет термоакустических аппаратов. При увеличении амплитуды колебания давления погрешность расчета может существенно возрасти. Эта особенность сужает класс исследуемых устройств. Также эта программа имеет сложный интерфейс создания расчетных схем, что увеличивает вероятность появления ошибки при построении математической модели рассчитываемого устройства.

Особое место среди этих программ занимает Sage. Она может рассчитывать широкий класс устройств (ГХМ Стирлинга, Гиффорда-Макгона и т.д.). Также это приложение обладает графическим интерфейсом создания расчетных схем. Эти схемы создаются из элементов, которые обладают определенными свойствами (регенератор, теплообменник и т.д.). Sage имеет хорошие рекомендации от Sunpower [16], одного из крупнейшего производителя криогенных устройств мира.

Все эти программы обладают одним существенным недостатком – они с закрытым кодом и в них отсутствуют опции для изучения влияния коэффициентов гидравлического сопротивления и теплоотдачи. Эта необходимость возникает при исследовании влияния эмпирических соотношений на точность опре-

деления интегральных характеристик устройств. То есть, нет возможности управлениями моделями без участия их разработчиков. В одномерных математических моделях эти соотношения оказывают сильное влияние на точность расчета параметров ГХМ.

Поэтому за основу была взята математическая модель, которая основана на структурно-модульном представлении криосистем и позволяет рассчитывать, практически, все типы ГХМ [17].

Структурные схемы ГХМ представляются в виде комбинации модулей. В качестве модулей рассматривается магистрали (генераторы, газовые каналы и т.п.), соединяющие концевые полости (компрессорные зоны, зоны расширения, конфузоры).

Процессы в магистралях описываются системой одномерных дифференциальных уравнений газовой динамики в частных производных (уравнения энергии, неразрывности, движения) [17]. Процессы в полостях описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями массы и энергии. Для сопряжения полостей и магистралей используются закон сохранения импульса и энергии. После конечно-разностной аппроксимации, полученная система алгебраических уравнений линейризуется и решается методом ортогональной прогонки.

Расчёт параметров ГХМ. Структурно-модульное представление даёт возможность для создания программы, в которой с помощью графического интерфейса можно будет формировать расчётные схемы. Также этот подход позволяет вкладывать различные модели для расчета параметров в одном и том же элементе машины.

В базовом варианте эта модель не позволяла рассчитывать знакопеременные течения рабочего тела, которые могут возникать в магистралях (регенератор ГХМ Стирлинга, пульсационная трубка). Это значительно сужало класс рассчитываемых устройств. Поэтому алгоритм был модернизирован для расчёта этих течений [18].

Так как классическая форма записи закона Ньютона-Римана не может учитывать сложное изменения параметров газа в поперечном сечении канала. Поэтому тепловой поток в магистралях и полостях в математической модели был записан в комплексной форме [19]. В результате, была создана программа в среде Lazarus, которая позволяет формировать в графическом режиме расчётные схемы ГХМ и вычислять их параметры.

Результаты расчётов интегральных характеристик машин с использованием модифицированной модели показали хорошее согласование с экспериментом [18, 20]. В этой работе был выполнен расчёт ГХМ Стирлинга. Режимные и геометрические характеристики представлены в работе [17]. На рисунке 1 показаны результаты расчёта. Рассогласование с экспериментальными данными не превышает 20 %.

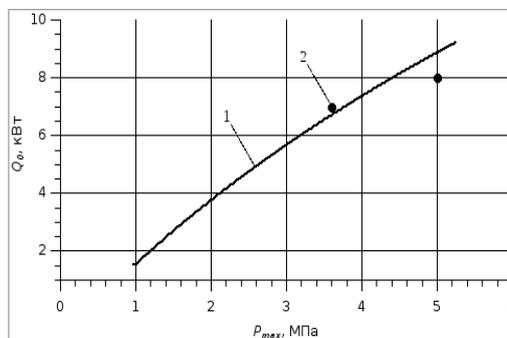


Рисунок 1 – Зависимость холодопроизводительности ГХМ Стирлинга от максимального давления в цикле:
1 – расчет; 2 – эксперимент

Литература

1. Kirillov N.G. Stirling Refrigerating Machine – Promising Equipment for Moderate Refrigeration / N.G. Kirillov // Chemical and Petroleum Engineering. Cryogenic Engineering, Production and Use Industrial Gas. – 2005. – P. 372–376.
2. Gauger D.C. Alternative technologies for refrigeration and air-conditioned application / D.C. Gauger, H.N. Shapiro, M.B. Pate. // Project Summary. U. S. Environmental Protection Agency. – May 1995.
3. Butler D. Life after CFCs and HCFCs / D. Butler // BRE publication. CIBSE National Conference. – 2001.
4. Dyson. R.W. On the Need of Multidimensional Stirling Simulations / R.W. Dyson, S.D. Wilson, R.C. Tew, R.Demko // Third International Energy Conversion Conference. – San Francisco, California. – 15–18 August, 2005.
5. Yong-Rak Kwon. Operational characteristic of Stirling Machinery / Yong-Rak Kwon, Berchowitz D.M // International Congress of Refrigeration, Washington, D.C. – 2003.
6. Berchowitz D.M. Maximized Performance of Stirling Cycle Refrigerators / D.M. Berchowitz // IIR Conference –

Natural Working Fluids, Oslo, Norway. – 1998.

7. Kim S.-Y. The Application of Stirling Cooler to Refrigeration / Kim S.-Y., Chung W.-S., Shin D.-K. and Cho K.-S // Proceedings, 32nd IECEC, Hawaii, USA. – 1997.

8. Berchowitz D.M. Recent advances in Stirling Cycle Refrigeration / D.M. Berchowitz, D. Kiikka and B.D. Mennink // 19th IIR Conference, The Hague, the Netherlands. – August 20–25, 1995.

9. Janssen M. Measurement and application of performance characteristics of a Free Piston Stirling Cooler / M. Janssen, P. Beks // Ninth International Refrigeration and Air Conditioning Conference, Purdue. – 2002

10. Welty S.C. Energy efficient freezer installation using natural gas and a Free Piston Stirling Cooler/ S.C. Welty, F. Cueva // VI International Refrigeration and Air Conditioning Conference, Trabajo. – 2001. – № 96. – P. 199–208.

11. Oguz E. Experimental Investigation of a Stirling Cycle Cooled Domestic Refrigerator / Oguz E., Ozkadi F. // IIR Conference at Purdue, USA. – 2002

12. Berchowitz D.M. Stirling Coolers for Solar Refrigerators / D.M. Berchowitz // International Appliance Technical Conference. Purdue University. USA. May 13–15, 1996.

13. Афанасьев В.А. Сравнение экологических и технических параметров парокомпрессионных холодильных машин и газовых холодильных машин / В.А. Афанасьев, Г.А. Марутов, А.М. Цейтлин // Вестник АГТУ. – 2011. – №2(52) – С. 11–14.

14. Губарь В.Ф. Эффективность комплексных теплонасосных установок Стирлинга с возобновляемыми источниками теплоты / В.Ф. Губарь, С.А. Горожанкин // Коммунальное хозяйство городов: Научно-технический сборник. – 2003. – Вып. 49. – С. 21–25.

15. Karandikar A. Low cost small cryocoolers for commercial applications / A. Karandikar, D. Berchowitz // Cryogenic Engineering Conference, Columbus, Ohio – 1995.

16. Wilson K.B. The use of Sage simulation software in the design and testing of Subpower's pulse-tube cryocoolers // Master of Sciences thesis. – Ohio Unoversity. – 2005.

17. Подольский А.Г. Структурно-модульный анализ термогазодинамики криогенных систем с нестационарными процессами. Дис. на соискание степени д-ра техн. наук: ФТИНТ. – 1986. – 315 с.

18. Кухаренко В.Н. Математическое моделирование теплофизических процессов низкотемпературных газовых при помощи структурно-модульного подхода / В.Н. Кухаренко, В.В. Кузнецов // Холодильна техніка і технологія. – 2009. – № 5(121). – С. 11–14.

19. Jeong S. Experimental study of the heat transfer in pulse tubes / S. Jeong, K. Nam, H.-M Chang , E.S. Jeong // Cryocoolers 11. – 2001. – P. 345–352.

20. Кузнецов В.В. Анализ влияния эмпирических соотношений на интегральные характеристики низкотемпературных охладителей с пульсационной трубкой / В.В. Кузнецов, В.Н. Кухаренко // Технические газы. – 2012. – №1. – С. 35–40.

УДК 621.59

Кузнецов В.В., Кухаренко В.М.

ОГЛЯД ВИКОРИСТАННЯ ГАЗОВИХ ХОЛОДИЛЬНИХ МАШИН У ПОМІРНОМУ ТЕМПЕРАТУРНОМУ ДІАПАЗОНІ

У статті розглянуто застосування газових холодильних машин в помірному температурному діапазоні. Ці пристрої можуть конкурувати з парокомпресійними холодильними машинами в цьому діапазоні. Був проведений огляд математичних моделей і програм для розрахунку характеристик газових холодильних машин. Виконано розрахунок машини Стірлінга. Розузгодження з експериментальними даними не перевищило 20 %.

Kuznetsov V.V., Kukharenko V.N.

REVIEW OF GAS REFRIGERATING MACHINES USAGE IN THE MODERATE TEMPERATURE RANGE

In given article the gas refrigerating machine usage on the moderate temperature range has considered. These devices can compete with the vapor compression refrigeration machines in this range. A review of mathematical models and software for calculating the characteristics of gas refrigerating machines have performed. The calculation of the Stirling machine has carried out. Mismatch with the experimental data did not exceed 20 %.