

УДК 621.59

**В.В. Трандафілов, О.Ю. Яковлева, М.Г. Хмельнюк**

Одесская национальная академия пищевых технологий,

Учебно-научный институт холода, криотехнологий и экоэнергетики им. В.С. Мартыновского,

ул. Дворянская, 1/3, Одесса, 65082, Украина

**ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГАЗОВЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН СТИРЛИНГА УМЕРЕННОГО ХОЛОДА**

*В статье рассмотрена возможность работы газовой холодильной машины Стирлинга в области умеренного холода. Проанализированы характерные особенности конструктивно-го исполнения машины Стирлинга с целью выявить дефекты, недостатки, и предложить способ их устранения. Показаны основные преимущества газовой холодильной машины Стирлинга: экологическая безопасность, более высокий энергетический коэффициент, меньшие габариты и ниже потребляемая энергия. Рассмотрен опыт производства и проблемы создания высокоэффективных холодильных машин Стирлинга. Полученные данные позволяют утверждать о большой перспективности применения газовых холодильных машин Стирлинга в области температур умеренного холода для малых и средних значений холодопроизводительности.*

**Ключевые слова:** Экологическая безопасность; Энергетическая эффективность; Холодильная машина Стирлинга; Умеренный холод; Парокомпрессионная холодильная машина; Математическая модель.

**В.В. Трандафілов, О.Ю. Яковлева, М.Г. Хмельнюк**

Одеська національна академія харчових технологій,

Навчально-науковий інститут холоду, криотехнологій та екоенергетики ім. В.С. Мартиновського,

вул. Дворянська, 1/3, Одеса, 65082, Україна

**ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ГАЗОВИХ ХОЛОДИЛЬНИХ МАШИН СТИРЛІНГА ПОМІРНОГО ХОЛОДУ**

*У статті розглянуто можливість роботи газовой холодильної машини Стирлінга в області помірного холоду. Проаналізовано характерні особливості конструктивного виконання машини Стирлінга з метою виявити дефекти, недоліки, і запропонувати спосіб їх усунення. Показані основні переваги газовой холодильної машини Стирлінга: екологічна безпека, більший високі енергетичний коефіцієнт, менші габарити і нижче споживана енергія. Розглянуто досвід виробництва і проблеми створення високоефективних холодильних машин Стирлінга. Отримані дані дозволяють стверджувати про велику перспективність застосування газових холодильних машин Стирлінга в області температур помірного холоду для малих і середніх значень холодопродуктивності.*

**Ключові слова:** Екологічна безпека; Енергетична ефективність; Холодильна машина Стирлінга; Помірний холод; Парокомпрессионная холодильна машина; Математична модель.

DOI: 10.15673/0453-8307.3/2015.38075



This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>**I. ВВЕДЕНИЕ**

Рост цен на топливно-энергетические ресурсы (ТЭР) наряду с ростом загрязнения окружающей среды способствовали постановке задачи поиска инновационных технологий энергопреобразования, разработке новой техники на основе высокоэффективных термодинамических циклов, использованию новых видов ТЭР, новых рабочих тел и как следствие созданию экологически чи-

стых энергосистем, обеспечивающих удовлетворение нужд как промышленного сектора так и населения при минимальных затратах материальных ресурсов.

Одним из возможных путей решения указанной выше проблемы в секторе холодильной промышленности является использование в умеренном температурном диапазоне газовых холодильных машин (ГХМ), работающих по обратному циклу Стирлинга.

Цикл Стирлинга была запатентован в 1816 г. шотландским изобретателем Робертом Стирлингом первоначально реализован в тепловом двигателе (впоследствии названном двигателем Стирлинга), работающем на подогретом воздухе.

Возможность использовать цикл Стирлинга для создания холодильных машин умеренного холода была впервые выявлена еще в 1834 г. Дж. Гершелем., а в 1876 Александр Кирк дал описание машины, которая работала в течении 10 лет. Но тем не менее только в конце 1940-х была сделана серьезная попытка использовать холодильные машины, работающие по циклу Стирлинга, в коммерческих целях. Возобновление интереса к использованию машин Стирлинга умеренного холода связано со стремительным ростом научно-технических знаний и продвижений в области создания двигателей и криогенных машин Стирлинга [1].

В настоящее время мы все чаще обращаемся к использованию ГХМ Стирлинга умеренного холода, что позволяет нам работать в более широком диапазоне значений температур охлаждения (от 0 до - 80 °С) в одной машине и получать более высокую энергетическую эффективность. Теоретическая эффективность холодильных машин Стир-

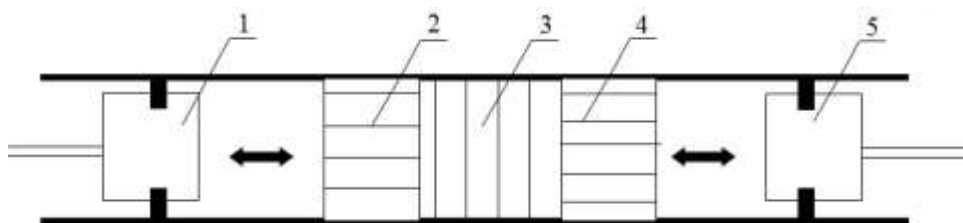
линга умеренного холода равна эффективности идеальной холодильной машины, работающей по циклу Карно.

В качестве рабочих тел для машин Стирлинга обратного цикла могут применяться вещества (гелий, водород, азот, воздух), полностью отвечающие требованиям Монреальского протокола по озоноразрушающим веществам и Киотского протокола по выбросам парниковых газов.

Поэтому широкое внедрение холодильных машин Стирлинга умеренного холода позволяет в комплексе "эффективность + экологическая чистота" решить проблему создания соответствующих современным требованиям систем холодоснабжения [2].

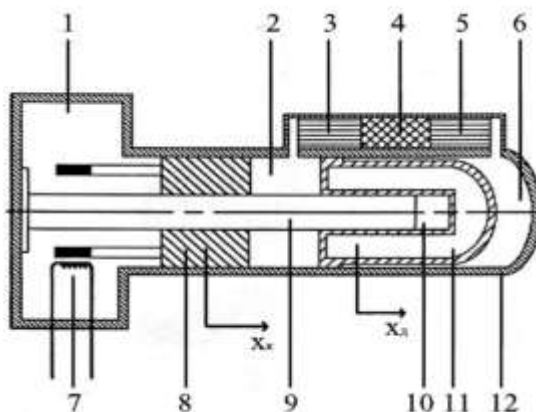
## II. ГАЗОВЫЕ ХОЛОДИЛЬНЫЕ МАШИНЫ СТИРЛИНГА

Из многообразия существующих компоновочных схем и конструктивного исполнения отдельных узлов ГХМ Стирлинга, можно выделить две основные конфигурации: по расположению поршня, вытеснителя друг относительно друга [3]. Первый тип изображен на рисунке 1, а второй на рисунке 2.



**Рисунок 1** – Газовая холодильная машина, работающая по обратному циклу Стирлинга [3]

1 – рабочий поршень, 2 – холодильник, 3 – регенератор, 4 – теплообменник нагрузки, 5 – поршень-вытеснитель.



**Рисунок 2** – ГХМ Стирлинга со свободным поршнем [3]

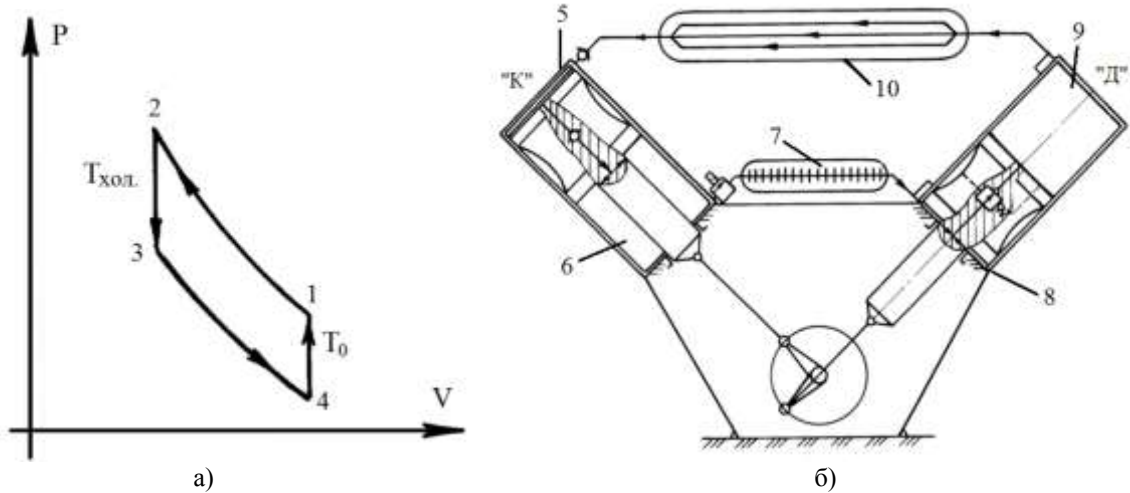
1,2,6 – буферная, компрессорная и детандерная полости; 3 – холодильник; 4 – регенератор; 5 – теплообменник нагрузки; 7 – линейный привод; 8 – поршень; 9 – стержень вытеснителя; 10 – пружина; 11 – детандер; 12 – корпус.

Различие в этих двух схемах в том, что во втором случае теплый конец вытеснителя находится в компрессорной полости. Вытеснитель может быть свободным (пневматический привод). Движение рабочего поршня может обеспечивать механический привод или линейный (рисунок 2).

При всей надежности машин, работающих по этому циклу Стирлинга, недостатком является наличие регенератора, что приводит к усложнению машин, значительным свободным объемам и увеличению гидравлического сопротивления, совместное влияние которых приводит к скруглению P-V диаграммы холодильной машины, т.е. к снижению ее удельной холодопроизводительности. Из этого следует вывод, что для повышения эффективности машины требуется постоянное усовершенствование конструкции регенератора.

Поставленная задача решается тем, что в ГХМ Стирлинга путем изменения способа получения холода при котором отпадает надобность в

регенераторах, что существенно снижает свободные объемы [4]. Рабочее тело после выхода из морозильника поступает в приемную полость компрессора, это позволяет использовать остаточный после морозильной камеры холод, что снижает тепловые потери. Способ получения холода в ГХМ Стирлинга путем сжатия рабочего тела в надпоршневой компрессорной полости, его изохорного перепуска и расширения в надпоршневой детандерной полости, отличающийся тем, что сжатие и расширение ведут адиабатически, а перепуск рабочего тела после сжатия и расширения осуществляют одновременно с обеспечением соединения подпоршневых и надпоршневых полостей соответственно. На рисунке 3а представлена P-V диаграмма цикла; на рисунке 3б схема машины, работающая по предлагаемому способу, у которого фазы детандера Д и компрессора К сдвинуты на  $180^\circ$ .



**Рисунок 3** – Газовая холодильной машины работающая по предлагаемому способу [4]

а) P – V диаграмма цикла Стирлинга; б) принципиальная схема;

К – компрессор; Д – детандер; 5 – надпоршневая приемная полость К;

6 – штоковая полость сжатия К; 7 – холодильник; 8 – штоковая приемная полость Д;

9 – надпоршневая полость расширения Д; 10 – морозильник.

Также существуют разновидности машины Стирлинга, не попадающие под вышеуказанные 2 основные конфигурации – это роторные машины Стирлинга. Они нашли свое применение в качестве двигателей систем когенерации [5]. Есть большой потенциал развития роторно-поршневых машин объемного расширения по циклу Стирлинга который может быть использован для развития технологий изготовления холодильных машин и тепловых насосов [6]. Предлагаемая роторно-лопастная машина имеет ряд преимуществ перед другими типами компрессоров, в том числе такие, как уравновешенность, многокамерность, возможность работы с бесконтактными уплотнениями.

Принимая во внимание все названные перспективы применения ГХМ Стирлинга в области

умеренного холода, основной акцент все же делается на сравнении энергетических параметров ГХМ Стирлинга с энергетическими параметрами традиционных пароконденсационных холодильных машин (ПКХМ) преобладающими в этой области.

Во-первых, коэффициент преобразования ГХМ Стирлинга слабо зависит от холодопроизводительности по сравнению с ПКХМ (рисунок 4). Температуры постоянны и одинаковы для двух типов холодильных машин [7].

Во-вторых, при малых значениях массогарбитные характеристики ГХМ Стирлинга значительно ниже массы ПКХМ (рисунок 5) [8].

В-третьих, гораздо меньше потребляемая энергия при одинаковых значениях температур охлаждения и окружающей среды (рисунок 6) [7].

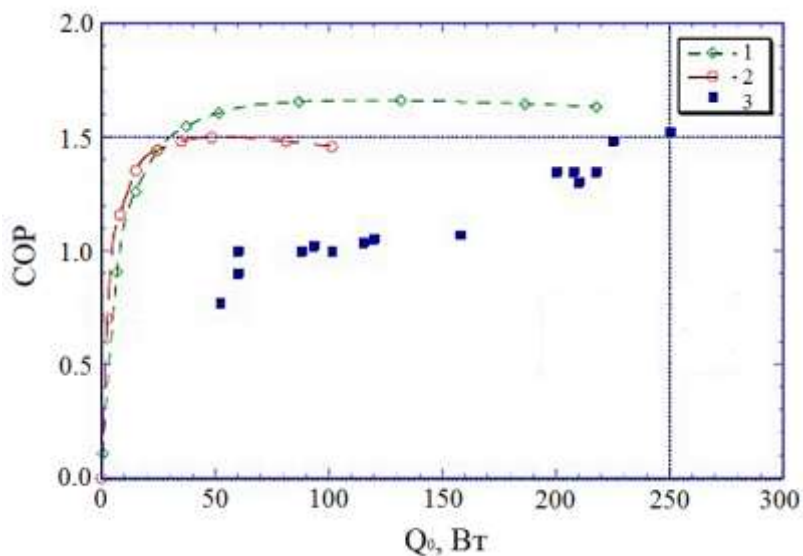


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента преобразования от холодопроизводительности [7]  
1,2 – ГХМ Стирлинга с  $Q_0$  200 Вт и 100 Вт соответственно; 3 – ПКХМ.

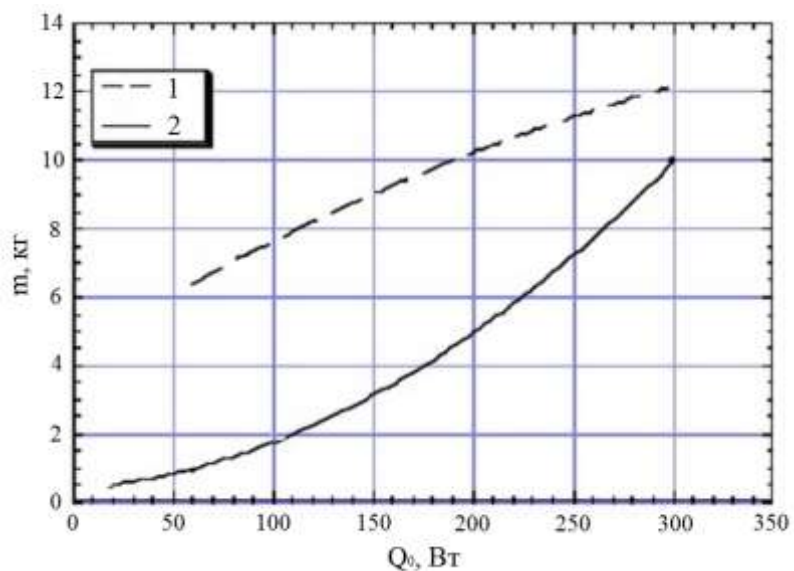


Рисунок 5 – Сравнение массы холодильных машин при различных значениях  $Q_0$  [8]  
1 – ПКХМ; 2 – ГХМ Стирлинга.

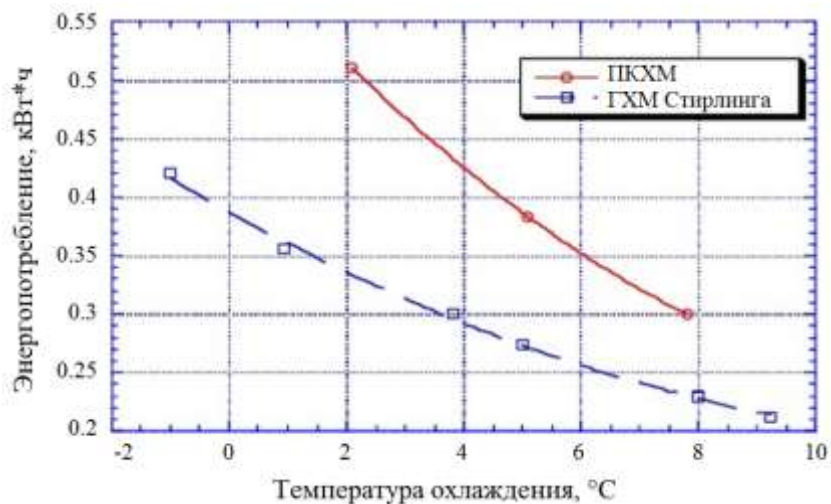


Рисунок 6 – Потребляемая мощность [7].

В работе [9] отмечается, что в области значений температуры ниже  $-30^{\circ}\text{C}$  эффективность ГХМ Стирлинга значительно выше, чем у ПКХМ. Это осложнение связано с необходимостью перехода к двухступенчатому сжатию в ПКХМ, что приводит к повышению стоимости этих установок [10]. Поэтому при этих температурах было бы предпочтительнее использовать ГХМ Стирлинга. К другим практическим преимуществам, характерным только для ГХМ Стирлинга, относится возможность использования для привода вместо электрической энергии любого вида тепловой энергии и возможность обратного преобразования холода в электрическую энергию. При температурах режима кондиционирования холодильный коэффициент ГХМ Стирлинга становится равным холодильному коэффициенту ПКХМ при потерях мощности на трение не более 40 % от действительной мощности цикла ГХМ Стирлинга. В этой области значений температуры при равных холодильных коэффициентах описанные объемы цилиндров ГХМ существенно больше, чем у ПКХМ. Недостатками ГХМ Стирлинга является ее более сложная конструкция по механике по сравнению с конструкцией ПКХМ и затруднения с использованием жидкой смазки механизма движения, что приводит в конечном счете к ее более высокой стоимости. Также к недостаткам ГХМ Стирлинга следует отнести то, что для отвода тепла от охлаждаемого объекта (например, в бытовом холодильнике) необходимы дополнительные способы переноса холода к этому объекту, что вынуждает использовать промежуточные хладоносители [11].

**Таблица 1** – Рейтинг ГХМ Стирлинга среди технологий для получения умеренного холода

Область применения	Место в рейтинге		
	ГХМ Стирлинга	ПКХМ	АХМ
Бытовые холодильники	3	1	2
Бытовые кондиционеры	4	1	2
Транспортные кондиционеры	2	1	3
Промышленный холод	3	1	2
Промышленные кондиционеры	5	1	2

Сегодня в мире перспективность использования машин Стирлинга в области умеренного холода становится очевидной [15]. Проблемы создания новых образцов машин Стирлинга и их производства занимается не менее 140 крупных компаний и исследовательских организаций, многие из которых достигли значительных успехов, и вышли на серийное производство.

Так, уже в ближайшее время в ряде европейских стран и Южной Кореи планируется начать массовый выпуск бытовых холодильников на основе холодильных машин Стирлинга с линейным

### III. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА О ПРОИЗВОДСТВЕ МАШИН СТИРЛИНГА УМЕРЕННОГО ХОЛОДА

В 1995 г. Американское агентство по защите окружающей среды составило рейтинг холодильных технологий для получения умеренного холода (термоэлектричество, ГХМ Стирлинга и т.д.) по 5 критериям [12]: эффективность, уровень развития технологии, сложность конструкции, компактность и масса, эксплуатационные расходы.

В результате было получено, что традиционные холодильные циклы, а именно ПКХМ и абсорбционные холодильные машины (АХМ), превосходят все альтернативные холодильные технологии. При этом отмечалось, что ГХМ Стирлинга имеет наиболее высокий потенциал для использования в умеренном холоде, нежели другие альтернативные технологии получения холода. Результаты сравнения приведены в таблице 1.

Однако, несмотря на высокие позиции в этом рейтинге, авторы отвергли возможность использования ГХМ Стирлинга в умеренном температурном диапазоне. Но в одном из докладов на национальной конференции CIBSE был сделан вывод, что нужны дополнительные исследования для однозначного ответа о применении этих машин в холодильной технике [13]. Однако отказ от целого ряда наиболее энергоэффективных фреонов ПКХМ может повлиять на передел позиций в рейтинге холодильной техники [14].

приводом. Результаты исследований показывают, что достигнутый уровень в проектировании машин Стирлинга позволяет создавать холодильные машины Стирлинга умеренного холода производительностью до 100 кВт с эффективностью в 1,5 раза выше, чем у лучших образцов ПКХМ, при этом массогабаритные характеристики сокращаются до 20-30 %.

Помимо ведущих стран в области проектирования и создания машин Стирлинга, каковыми являются США, Великобритания, Япония, ФРГ, Швеция и Нидерланды, в последнее время нача-

лись интенсивные исследования в данной области техники в Китае, ЮАР, Австралии, Израиле, Канаде, Индии и ряде других стран.

На рынке холодильного оборудования крупных магазинов и складов для хранения продуктов питания появились высокоэффективные экологически чистые холодильные машины умеренного холода. Так, в Институте прикладной термодинамики и холодильной техники в университете города Эссен (Германия) создана холодильная машина Стирлинга производительностью 10 кВт при температуре минус 35 °С (238 К) для крупных магазинов, конкурирующая по своим характеристикам и цене с ПКХМ на R12.

В настоящее время наиболее серьезных результатов в серийном производстве высокоэффективных машин Стирлинга умеренного холода добились американцы. Еще в конце 90-х годов фирма Sunpower Inc. на основе серийно выпускаемых криогенераторов Стирлинга создала холодильную машину умеренного холода для крылатого летательного аппарата многоразового использования Space Shuttle. Бортовой холодильник работал на двух температурных уровнях +4 °С и - 22 °С и успешно прошел цикл летных испытаний во время полета Space Shuttle STS-60 [16].

Фирмой создана новая холодильная машина Стирлинга для бытового холодильника, имеющая эксергетический к.п.д. около 60 %, холодопроизводительностью 200 Вт на уровне 258 К. Стоимость этой модели, по предварительным расчетам, будет составлять 88 USD за единицу при серийном производстве 250 тыс. холодильников в год.

Фирмой Cryodynamics Inc. (США) создан домашний холодильник с машиной Стирлинга, который на уровне 250...271 К по эффективности также превосходит существующие парокомпрессионные холодильники. Холодильник имеет два контейнера, один из которых предназначен для замораживания продуктов, а другой для хранения охлажденных продуктов.

Фирма Stirling Ultracold подразделение Global Cooling B.V. считается одной из ведущих компаний в области создания свободнопоршневых холодильных машин Стирлинга. Этой фирмой выпускаются морозильные камеры (SU780UE, SU105U, ULT-25N) с холодильной машиной Стирлинга [17].

#### **IV. ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ ВЫСОКО-ЭФФЕКТИВНЫХ ХОЛОДИЛЬНИХ МАШИН СТИРЛИНГА**

Зарубежный опыт создания современных высокоэффективных машин Стирлинга показывает, что без точного математического моделирования рабочих процессов и оптимального конструирования основных узлов, доводка проектируемых машин превращается в многолетние изнурительные экспериментальные исследования.

В настоящее время западные фирмы, ведущие разработки в данной области, в основном

опираются на теоретические и экспериментальные исследования своих научных подразделений, технических университетов или создают технопарки по разработки отдельных типов машин Стирлинга. Далее, это сложность конструктивного исполнения отдельных узлов, проблемы в области уплотнений, регулирования мощности и т.д. [18].

Следует отметить, что машины Стирлинга широко применяются в криогенных устройствах и к настоящему времени накоплен достаточно большой опыт по расчету и конструированию ГХМ Стирлинга на азотном уровне температур (77 К).

Однако переход от уровня криогенных температур к умеренным не позволяет без обработки на макетных и опытных образцах перенести существующие расчетные методики и технологические решения на ГХМ Стирлинга. Так, например, гелий, обладает сверхтекучестью, что определяет повышенные требования к уплотняющим элементам рабочий поршней, штока вытеснителя и т.д.

Формирование облика перспективных, предполагаемых к производству машин Стирлинга невозможно без разработки новых технических решений основных узлов. Третья проблема - это высокий уровень технологии производства. Данная проблема связана с необходимостью применения в машинах Стирлинга цветных металлов, их сварки и пайки. Отдельный вопрос изготовление регенератора и насадки для него, для обеспечения с одной стороны высокой теплоемкости, а другой стороны, низкого гидравлического сопротивления. Все это требует высокой квалификации рабочего персонала и современного технологического оборудования.

#### **V. ВЫВОДЫ**

Таким образом, ГХМ Стирлинга – это “абсолютная” экологическая безопасность. Характерным только для ГХМ Стирлинга, является возможность использования для привода вместо электрической энергии любого вида тепловой энергии и возможность обратного преобразования холода в электрическую энергию. При температурах режима кондиционирования холодильный коэффициент ГХМ Стирлинга становится равным холодильному коэффициенту ПКХМ при потерях мощности на трение не более 40 % от действительной мощности цикла ГХМ Стирлинга. К недостаткам ГХМ Стирлинга можно отнести то, что при равных холодильных коэффициентах описанные объемы цилиндров ГХМ Стирлинга существенно больше, чем у ПКХМ, что приводит к увеличению массогабаритных характеристик, что в свою очередь отражается на росте капитальных затрат на производство.

Еще одной отличительной способностью ГХМ Стирлинга то, что для отвода тепла от охлаждаемого объекта (например, в бытовом холодильнике) необходимы дополнительные способы переноса холода к этому объекту, что вынуждает

использовать промежуточные хладоносители.

В результате исследования, говоря о перспективе развития газовых холодильных машин Стирлинга, необходимо сделать ряд заключений:

– Высокая наукоемкость данной области техники является основным сдерживающим фактором широкого распространения машин, работающих по циклу Стирлинга;

– Успех в создании конкурентоспособных на мировом рынке машин Стирлинга может быть достигнут только как результат синтеза высокого уровня научных исследований, тщательной конструктивной проработки основных узлов машин Стирлинга и передовой технологии производства.

Удешевление стоимости конструкции ГХМ Стирлинга, что немало важно, позволяет нам перейти к ее широкому применению, пренебрегая недостатками, использовать эту машину в области температур умеренного холода для малых и средних значений холодопроизводительности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Уокер Г.** Машины, работающие по циклу Стирлинга. Пер. с англ. М.: Энергия. 1978. – С. 152.
2. **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, pp. 372–376.
3. **Кузнецов В.В.** Теоретический анализ термодинамических параметров газовых холодильных машин на температурный уровень 150-250 К: дис. на соискание наук. степени. канд. техн. наук. / В. В. Кузнецов; – Харьков, 2014. – С. 24-37.
4. **Грамм В.А.**, и др. Способ получения холода. Пат. РФ № 2057999 - Заявлено 29.10.1999; Опубл. 20.05.2000.
5. **Лукьянов Ю.Н.**, и др. Роторно-поршневой двигатель с внешним подводом тепла. Пат. РФ № 2387844 - Заявлено 28.05.2008; Опубл. 27.04.2010.
6. **Драчко Е.Ф.** Роторно-поршневая машина объемного расширения. Пат. РФ № 2528221 - Заявлено 6.11.2009; Опубл. 10.09.2014.
7. **Berchowitz D.M.** Maximized Perfomance of Stirling Cycle Refrigerators. // IIR Conference. – Natural Working Fluids, Oslo, Norway, 1998.
8. **Berchowitz D.M.** Design and testing of a 40 w free-piston stirling cycle cooling unit. // 20th IIR Conference, Sydney, Australia, 1999.
9. **Афанасьев В.А., Марутов Г.А., Цейтлин А.М.** Сравнение экологических и технических параметров парокомпрессионных холодильных машин и газовых холодильных машин работающих по циклу Стирлинга/Вестник АГТУ. – 2011.– №2 (52) – С. 11–14.
10. **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 IECES, Hawaii, USA. – 1997.
11. **Oguz E.** Experimental Investigation of a Stirling Cycle Cooled Domestic Refrigerator / Oguz E., Ozkadi F. // IIR Conference at Purdue, USA. – 2002.
12. **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.
13. **Butler D.** Life after CFCs and HCFCs / D. Butler // BRE publication of CIBSE Nation Conference. – 2001.
14. **Костылев И.И.** Проблема отказа от хладагентов, Неблагоприятных для окружающей среды / И.И. Костылев, Н.В. Ладин, С.А. Кукин // Транспорт Российской Федерации. – 2011. - №1(32). – Стр. 68- 71.
15. **Kirillov N.G.** Energy and the environment in the production of cold: refrigerating machines Stirling medium-temperature cold. *Internet - journal Holodilshhik*, 2008, vol. 5, no. 46 / S.-Peterburg. [Электронный ресурс] — Режим доступа: [www.holodilshchik.ru](http://www.holodilshchik.ru) ( 4 Февраля 2015).
16. Sunpower Inc. [Электронный ресурс] — Режим доступа: <http://sunpowerinc.com/cryocoolers/applications> ( 5 Февраля 2015).
17. Global Cooling. Inc.: Ultra Low Freezers. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [www.stirlingultracold.com/ultra-low-freezers](http://www.stirlingultracold.com/ultra-low-freezers) (6 Февраля 2015).
18. Russia Engineering. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [www.russianengineering.narod.ru/energie/stirling](http://www.russianengineering.narod.ru/energie/stirling) (6 Февраля 2015).

V. Trandafilov, O. Yakovleva, M. Khmelniuk

Odessa National Academy of Food Technologies,  
Educational and research institute of refrigeration, cryotechnology and ecoenergetics n.a. V.S. Martynovsky,  
Dvoryanskaya str., 1/3, Odessa, 65082, Ukraine  
orcid.org/0000-0001-9905-9958

## MEDIUM-TEMPERATURE STIRLING GAS-REFRIGERATING MACHINES DEVELOPMENT TRENDS

*Fuel and energy resources price surge as well as global warming pushes us to set problem of searching innovative technologies for energy transformation, to develop new technologies on the base of thermodynamic cycles with high efficiency, to use new working mediums in order to develop ecologically safe energy system, which can satisfy industrial sector alone with housing and utilities for minimum amount used. In this paper we describe Stirling refrigeration system for medium-temperature cooling. Stirling-engine embodiment characteristics are analyzed in order to derive defects, limitations as well as to propose the way of disadvantages removal. Principal advantages of Stirling refrigeration system are represented such as environmental safety, higher energy coefficient, overall detentions reducing and lower energy consumption. Construction problems and Stirling refrigeration system production with high efficiency are analyzed. Defined data let us to claim that The Medium-Temperature Stirling Refrigeration Systems use offers a bundle of benefits and opportunities for medium-temperature cooling.*

**Key words:** Environmental safety – Energy efficiency – Stirling refrigerating machine – Medium-temperature refrigeration – Vapor-compression refrigerating machine – Mathematical model

### REFERENCES

1. Walker, G. 1973. Stirling-Cycle Machines. *Hardcover*, 152 p.
2. Kirillov, N.G. 2005. Stirling Refrigerating Machine – Promising Equipment for Moderate Refrigeration. *Chemical and Petroleum Engineering. Cryogenic Engineering, Production and Use Industrial Gas*, 372–376.
3. Kuznetsov, V.V. 2014. Teoreticheskij analiz termogazodinamicheskikh parametrov gazovyh holodil'nyh mashin na temperaturnyj uroven 150-250K. Diss. na soiskanie nauk. stepeni. cand. tehn. Nauk [Theoretical analysis parameters thermogasdynamics gas refrigerators on the temperature level of 150-250 K. Cand. tech. sci. diss.]. *Harkov*, 24-37.
4. Gramsh, V. A. 2000. Sposob poluchenija holoda [A method of producing a cold]. Patent. RF no. 205799, 2000.
5. Lukjanov, Ju. N. 2010. Rotorno-porshnevoj dvigatel s vneshnim podvodom tepla [Rotary-piston engine with an external supply of heat]. Patent. RF no. 2387844, 2010.
6. Drachko, E.F. 2014. Rotorno-porshnevaja mashina obemnogo rasshirenija [Rotary-piston machine volume expansion]. Patent. RF no. 2528221, 2014.
7. Berchowitz, D.M. 1998. Maximized Performance of Stirling Cycle Refrigerators. *IIR Conference – Natural Working Fluids*, Oslo, Norway.
8. Berchowitz, D.M. 1999. Design and testing of a 40 w free-piston stirling cycle cooling unit. *20th IIR Conference*, Sydney, Australia.
9. Afanas'ev, V.A., Marutov, G.A., Cejtin, A.M. 2011. Sravnenie jekologicheskikh i tehniceskikh parametrov parokompressionnyh holodil'nyh mashin i gazovyh holodil'nyh mashin, rabotajushhh po ciklu Stirlinga. *Vestnik AGTU (in Russian)*.
10. Kim, S.-Y., Chung, W.-S., Shin, D.-K., Cho, K.-S. 1997. The Application of Stirling Cooler to Refrigeration. *Proceedings, 32-nd IECEC*, Hawaii, USA.
11. Oguz, E., Ozkadi, F. 2002. Experimental Investigation of a Stirling Cycle Cooled Domestic Refrigerator. *IIR Conference at Purdue*, USA.
12. Gauger, D.C., Shapiro, H.N., Pate, M.B. 1995. Alternative technologies for refrigeration and air-conditioned application. Project Summary. *U.S. Environmental Protection Agency*. – May 1995.
13. Butler, D. 2001. Life after CFCs and HCFCs. *BRE publication of CIBSE Nation Conference*.
14. Kostylev, I.I., Ladin, N.V., Kukin, S.A. 2011. Problema otkaza ot hladagentov, neblagoprijatnyh dlja okruzhajushhej sredy. *Transport rossijskoj federacii*. (in Russian)
15. Kirillov, N.G. 2008. Energy and the environment in the production of cold: refrigerating machines Stirling medium-temperature cold. *Internet-journal Holodilshhik*, 5(46). Available at: [www.holodilshhik.ru](http://www.holodilshhik.ru). (accessed 4 February 2015).
16. Sunpower Inc. Available at: <http://sunpowerinc.com/cryocoolers/applications> (accessed 5 February 2015).
17. Global Cooling. Inc.: Ultra Low Freezers. Available at: [www.stirlingultracold.com/ultra-low-freezers](http://www.stirlingultracold.com/ultra-low-freezers) (accessed 6 February 2015).
18. Russia Engineering. Available at: [www.russianengineering.narod.ru/energie/stirling](http://www.russianengineering.narod.ru/energie/stirling) (accessed 6 February 2015).

Отримана в редакції 19.02.2015, прийнята до друку 23.04.2015