УДК 621.56:59

ХОЛОДИЛЬНЫЕ МАШИНЫ СТИРЛИНГА:

ОСОБЕННОСТИ, ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Канд. техн. наук **Н.Г. КИРИЛЛОВ**
Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского

Созданная за последнее столетие руками человека система искусственного охлаждения оказывает на окружающую среду значительное негативное воздействие. Основными проявлениями этого воздействия стали всеобщие проблемы XXI в. (уменьшение озонового слоя Земли, усиление «парникового эффекта», глобальное потепление и т.д.), требующие срочного решения. Одними из заслуживающих внимания способов решения этих проблем являются альтернативные парокомпрессионному способы получения холода: абсорбционные, воздушные, солнцеиспользующие холодильные машины, машины на основе цикла Стирлинга и др.

In the article of the review nature the peculiarities of refrigerating machines based on Stirling cycle are considered as well as their benefits, possibility of use in the technique of moderate refrigeration, experience of use in cryogenic engineering and for development of heat pumps. Current level and prospects of development and use of a domestic refrigerating Stirling machine are considered.

Особенности машин Стирлинга

Производство и использование холодильных машин Стирлинга для умеренного холода являются одним из перспективных направлений развития холодильной техники в XXI в., что обусловлено экологической чистотой применяемых рабочих веществ и высокой эффективностью цикла Стирлинга [5].

Принципиальные особенности этих холодильных машин – совмещение в одном устройстве процессов сжатия и расширения рабочего вещества, теплообмена между его прямым и обратными потоками, а также внешнего теплообмена с охлаждаемым объектом и с окружающей средой – обусловливают их компактность и высокую термодинамическую эффективность.

Холодильные машины Стирлинга экологически чистые: в качестве рабочего вещества в них могут использоваться гелий, азот, водород и воздух, полностью безвредные для окружающей среды, что позволяет удовлетворять самым жестким требованиям Монреальского и Киотского протоколов.

Термодинамический цикл Стирлинга был предложен в 1816 г. шотландцем Робертом Стирлингом. С середины XIX в. словосочетание "машина Стирлинга" стало широко употребляться как в классической термодинамике, так и в бытовом обиходе. Машины Стирлинга работают по замкнутому термодинамическому циклу, в котором циклические процессы сжатия и расширения происходят при различных уровнях температур, а управление потоком рабочего вещества осуществляется путем изменения его объема.

Цикл Стирлинга состоит из двух изотерм и двух изохор. Наличие изотермических процессов определяет равенство термодинамической эффективности идеального цикла Стирлинга и цикла Карно [4].

Особенности машин Стирлинга:

• нестационарность (во времени) параметров рабочего вещества в каждой точке системы. Практически это означает, что машина Стирлинга, рабочие полости которой заключены в едином объеме, неизбежно должна быть машиной с периодическим чередованием объемов сжатия и расширения, т.е. поршневой машиной. Ввиду этого преимущественные области применения таких машин – малые и средние мощности;

• работа только на газообразном рабочем веществе. Чтобы размеры машин при заданной мощности были приемлемы, а внешний и внутренний теплообмен рабочего вещества в этих условиях проходил достаточно эффективно, давление в машине должно быть существенно выше атмосферного. По тем же причинам рабочее вещество должно иметь малую вязкость, возможно бóльшие теплопроводность и теплоемкость, мало зависящие от давления (иначе возникнут большие собственные потери в регенераторе вследствие различных тепловых эквивалентов теплообменивающихся потоков);

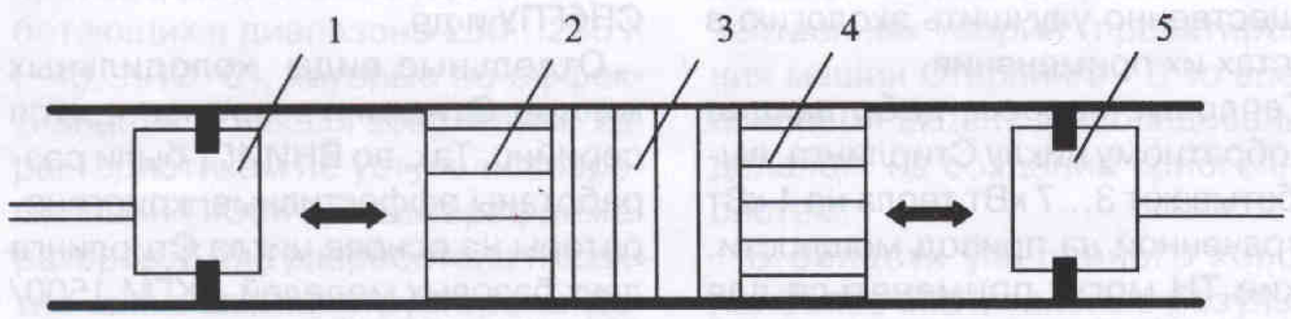
• возможность получения большой разности между верхней и нижней температурами цикла при относительно малых отношениях давлений в процессах сжатия и расширения (благодаря регенерации тепла);

• использование в качестве рабочих веществ водорода, гелия, азота воздуха и других газов. Газы с высоким значением газовой постоянной R (например, водород или гелий) позволяют получать в машинах Стирлинга эксергетический КПД выше 60%;

• универсальность. Возможно создание машин, работающих как по прямому, так и по обратному циклам (криогенные машины, холодильные машины умеренного холода и тепловые насосы).

Обобщенная принципиальная схема машины Стирлинга представлена на рисунке.

В настоящее время разработано большое число компоновочных схем и вариантов конструктивного исполнения отдельных узлов ма-



Принципиальная схема машины Стирлинга:
1 – рабочий поршень; 2 – холодильник; 3 – регенератор;
4 – теплообменник нагрузки; 5 – поршень-вытеснитель

шин Стирлинга. Так, только одних приводов известно более 18 типов. Однако наиболее широкое распространение получили машины Стирлинга, выполненные по α, β, γ - схемам.

Области применения холодильных машин Стирлинга

Техника умеренного холода

Идея использования цикла Стирлинга для создания холодильных машин умеренного холода ненова. В 1834 г. Дж. Гершелем были изготовлены опытные образцы холодильных машин Стирлинга, которые впоследствии получили широкое распространение. Такие машины успешно эксплуатировались в пищевой промышленности. Ими были оснащены многие промысловые суда Англии (для замораживания рыбы). С 1876 г. холодильные машины Стирлинга применялись в Шотландии на фабриках по производству парафиновых мастик. Однако из-за своего тогдашнего несовершенства к началу XX в. они были полностью вытеснены компрессионными холодильными машинами.

Нынешнее возрождение интереса к машинам Стирлинга в области умеренного холода связано в основном со значительными успехами, достигнутыми в последнее время в создании двигателей и криогенных машин Стирлинга.

За рубежом уже начато серийное производство холодильных машин Стирлинга для умеренного холода, по своей эффективности и экологической чистоте превосходящих машины, работающие по другим циклам. Табл. 1 дает представление о характеристиках холодильных машин Стирлинга производства некоторых зарубежных фирм [11].

Современный уровень науки и технологии позволяет создавать холодильные машины Стирлинга для умеренного холода холодопроизводительностью до 100 кВт с эффективностью в 1,5 раза выше, чем у лучших образцов парокомпрессионных машин. При этом массогабаритные характеристики сокращаются на 20–30%.

Ведущими странами в области проектирования и создания машин Стирлинга являются США, Великобритания, Япония, ФРГ, Швеция и Нидерланды. В последнее время начались интенсивные исследования в данной области в Китае, ЮАР, Австралии, Израиле, Канаде, Индии и ряде других стран, что подтверждается результатами патентных исследований. Недавно в Международном институте холода создана рабочая группа, деятельность которой направлена на изучение, пропаганду и широкое внедрение в практику холодильных машин Стирлинга для умеренного холода.

Таблица 1.

Холодильные машины Стирлинга для умеренного холода

Фирма-изготовитель	Холодопроизводительность, кВт (t_0, °C)	Эффективность в сравнении спарокомпрессионнымии холодильными машинами
Институт холодильной техники г. Эссен (Германия)	10 (–35)	Такая же
"Stirling Thermal Motors (SMT)"	25 (–30)	Выше
"Stirling Power Systems (SPS)	3, 10 (–30)	"
"Sunpower Inc."	0,25 (–25)	"
"General Electric" (США)	0,3 (–20)	Выше на 16 %
"Global Cooling B.V."	0,3 (–20)	Выше на 30 %

Техника глубокого холода (криогенная техника)

Криогенные газовые машины Стирлинга (КГМ Стирлинга) получили наиболее широкое распространение в микрокриогенике и при сжижении технических газов. Однако особый интерес представляет разработка новейших технологий (Стирлинг-технологий) сжижения и хранения природного газа, получения жидкого кислорода и азота, улавливания легких фракций углеводородов при хранении нефтепродуктов, долговременного хранения криогенного топлива, быстрого замораживания и хранения продуктов питания, автономного криогенного холодоснабжения и др.

Возможность применения КГМ Стирлинга для указанных целей определяется значительным опытом серийного производства данных машин зарубежной и отечественной промышленностью (табл. 2).

Одним из наиболее перспективных направлений является использование КГМ Стирлинга для производства на гаражных заправочных станциях сжиженного природного газа (СПГ), используемого как экологически чистое моторное топливо. Это связано с тем, что существующие КГМ Стирлинга наиболее эффективны при температурах около –160 °С, т.е. в области фазового перехода газообразного природного газа в жидкость. На этом температурном уровне ожижение природного газа с использованием цикла Стирлинга практически в 2–2,5 раза эффективнее, чем в дроссельных и детандерных циклах [3, 9].

В настоящее время по разработкам автора статьи создана опытно-промышленная серия гаражных заправочных станций СПГ на основе КГМ Стирлинга. Станции под названием "Газотрон" производятся по ТУ РШФА.027239. 002ТУ, имеют заключение о промышленной безопасности, сертифицированы Госстандартом и допущены Госгор-

технадзором РФ к применению (разрешение на изготовление и применение №РРС-56-000104).

Результаты эксплуатации и технико-экономические расчеты показали, что стоимость 1 л СПГ, полученного на серийно производимых заправочных станциях СПГ с КГМ Стирлинга, в несколько раз ниже стоимости бензина. При этом окупаемость самих станций составит от 2,5 до 3 лет.

Тепловые насосы для систем децентрализованного теплоснабжения

Наиболее перспективным направлением в развитии децентрализованного теплоснабжения, предполагающего максимальное приближение источников тепла к потребителям, является применение тепловых насосов (ТН). За рубежом ТН, использующие низкопотенциальное бросовое тепло, позволяют ежегодно на 10 % сокращать потребление топливных ресурсов.

Стремительно растет массовое производство и использование ТН в США, Японии, ФРГ, во Франции, в Швеции, Дании, Австрии, Канаде и других развитых странах. В настоящее время в мире эксплуатируется более 50 млн тепловых насосов различной мощности.

По прогнозам Международного энергетического комитета по тепловым насосам, их доля в производстве тепловой мощности для отопления и горячего водоснабжения к 2020 г. в передовых странах составит 75%. В результате предлагаемое снижение расхода топлива составит 90%. Кроме того, ТН уже в ближайшее время позволят существенно улучшить экологию в местах их применения.

Тепловые насосы, работающие по обратному циклу Стирлинга, вырабатывают 3...7 кВт тепла на 1 кВт затраченной на привод мощности. Такие ТН могут применяться для теплоснабжения как вновь строящихся, так и реконструируемых зданий и сооружений. Особенно они подходят для рассредоточенных объектов, например фермерских хозяйств, таможенных и пограничных пунктов, коттеджей и отдельных строений [10].

В отличие от парокомпрессионных, абсорбционных и других типов ТН в тепловом насосе Стирлинга рабочее вещество в процессе всего цикла не меняет своего фазового состояния, что позволяет использовать в качестве источника низкопотенциальной теплоты окружающий воздух даже при температуре ниже –30 °С, а также нагревать теплоноситель до температур выше 100 °С.

Современный уровень и тенденции развития отечественных холодильных машин Стирлинга

В России существует достаточно много фирм–производителей холодильного оборудования на базе машин Стирлинга: ОАО "Машиностроительный завод "Арсенал", НПО "Гелиймаш", ОАО "Сибкриотехника", ГУП "НПО "Орион", ФГУП "КБ "Арсенал", ЗАО "НПО "Стирлингэкомаш" и ряд других.

Серьезные научные исследования машин Стирлинга проводились в ВКА им. А.Ф.Можайского, МГТУ им. Баумана, ВНИИГТ, ОмПИ, СПбГПУ и др.

Отдельные виды холодильных машин Стирлинга производятся серийно. Так, во ВНИИГТ были разработаны эффективные криогенераторы на основе цикла Стирлинга двух базовых моделей – КГМ 1500/80 и КГМ 900/80 с несмазываемыми поршневыми уплотнениями и ромбическим приводом, обеспечившим полную уравновешенность машин, в результате чего отпала необходимость в фундаментах. Позднее эти машины были переданы НПО "Гелиймаш" для серийного производства. На этом предприятии был разработан параметрический ряд КГМ на два температурных уровня – 20 и 80 К и на его базе налажен выпуск широкой номенклатуры высокоэффективного холодильного оборудования: азотодобывающих станций, ожижителей воздуха и т.д. Это оборудование отличалось компактностью, транспортабельностью, при монтаже не требовало установки специальных фундаментов, в обслуживании нуждалось лишь в периоды пуска и остановки. Однако в последнее десятилетие из-за отсутствия в России платежеспособных заказчиков его производство было прекращено.

Уникальные технологии, разработанные ГУП "НПО "Орион", позволили создать новое поколение фоторезисторов с интегрированной микрохолодильной схемой на основе свободно-поршневой криогенной машины Стирлинга для портативных тепловизионных систем. Использование микрохолодильных сплит-Стирлинг систем позволяет уменьшить потребление энергии, а также обеспечивает особую компактность и надежность систем наблюдения, тепловизионной техники, лазерных дальномеров и т.д.

В области создания холодильного оборудования для умеренного холода на основе машин Стирлинга Россия имеет пока небольшой опыт. Первые исследования по этой тематике начали проводиться в России с 1990 г. Так, на АОЗТ "АРСМАШ" в результате анализа холодильных установок для авторефрижераторной техники наиболее перспективной была названа холодильная машина Стирлинга. Были созданы опытные образцы таких холодильных машин холодо-

Таблица 2.

Криогенные газовые машины Стирлинга

Фирма–изготовитель	Модель КГМ	Холодопроизводительность, кВт, при t_0 = 77 К
Philips	PLA-107 (1); PLA-433 (4); PPG-2500	0,87; 3,5; 25
Stirling Cryogenics	SGL-1 (1); SGL-4 (4)	0,7; 3,0
Werkspoor	Werkspoor (1); (2); (3)	9,2; 18,4; 36
North American Philips	Модель B(4); Модель C(1); Модель D	3,4; 11,6; 46,9
МЗ "Арсенал"	ЗИФ-1000; ЗИФ-2002	1,0; 2,0
Гелиймаш	КГМ-9000/80; КГМ-15; КГМ-1500/80	9,6; 6,0; 1,5

производительностью до 5 кВт, работающих в диапазоне 230...285 К (–43...+12 °С), которые по эффективности и массогабаритным характеристикам не уступали современным ПКХМ для авторефрижераторов. Была разработана проектно-сметная и конструкторская документация на серийное изготовление этой техники, однако в связи с общим спадом в экономике дальнейшие работы были остановлены.

В настоящее время холодильные машины Стирлинга для умеренного холода производит ОАО "Сибкриотехника". Они обеспечивают холодопроизводительность 1 кВт при температуре 190...210 К (–83...–63 °С) и 1,5 кВт на температурном уровне 240...250 К (–33...–23 °С). Этими машинами оснащаются комплексы вакуум-сублимационной сушки и холодильные шкафы для медико-биологической, пищевой и других отраслей промышленности [1].

Крупномасштабное серийное производство машин Стирлинга для умеренного холода может быть налажено на ОАО "Машиностроительный завод "Арсенал", имеющем более чем 40-летний опыт проектирования и производства криогенных машин Стирлинга для воздухоразделительных установок ЗИФ-700, ЗИФ-1002, ЗИФ-2002.

Создание высокоэффективных холодильных машин Стирлинга для умеренного холода возможно только при наличии точной математической модели процессов в машине, без которой доводка проектируемых машин превращается в многолетнее дорогостоящее экспериментирование. Однако создание такой модели осложнено некоторыми особенностями реализации идеального цикла Стирлинга в реальных машинах. Это стало одной из главных причин неудач практически всех, как зарубежных, так и отечественных фирм, пытавшихся без серьезной научной проработки решать вопросы создания как двигателей, так и холодильных машин Стирлинга.

Россия в настоящее время обладает достаточным научным потенциалом для создания высокоэффективных холодильных машин Стирлинга. В период с 1956 по 1980 г. в МВТУ им. Баумана и Омском политехническом институте были заложены основы современных отечественных теорий проектирования машин Стирлинга. В то время основной акцент в исследованиях делался на создание криогенных систем.

В области умеренного холода наиболее значительные результаты были достигнуты в Военно-космической академии им. А.Ф.-Можайского, специалистами которой только с 1994 по 2002 г. получено около 120 патентов на различные технические решения, касающиеся как самих машин Стирлинга, так и систем с их использованием. За последние 5 лет в академии по данной тематике защищены 3 кандидатские и 1 докторская диссертации. Основные направления работ связаны с применением холодильных машин Стирлинга в системах холодоснабжения и термостатирования стационарных и подвижных боевых ракетных комплексов РВСН и другой специальной техники Министерства Обороны РФ [2, 6, 7].

В ВКА им. А.Ф.Можайского разработаны современные методологические основы расчета и проектирования машин Стирлинга, включающие в себя: методики многопараметрической оптимизации машин Стирлинга; структурный синтез машин Стирлинга на основе метода функционально-эксергетического анализа сложных тепломеханических устройств; оптимальное конструирование на основе теории решения изобретательских задач (ТРИЗ) и др. Полученные результаты позволяют проектировать машины Стирлинга с высокой эффективностью и без проведения дорогостоящих экспериментальных работ, связанных с доводкой отдельных узлов машин, что сокращает время на разработку машин Стирлинга (от составления технического задания на проектирование до создания готового к серийному производству опытного образца) до 1,5 – 2 лет [8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Громов А.В., Ляпин В.И.* и др. Результаты разработки и испытаний экологически чистых бесфреоновых холодильных установок на температурный уровень до – 80 °С// Тезисы докладов Международной науч.-техн. конф. "Холод и пищевые производства". – СПб., 1996.

2. *Кириллов Н.Г.* К вопросу создания холодильной машины Стирлинга умеренного холода//Сб. трудов Международной науч.-техн. конф. «Военно-морской флот и судостроение в современных условиях».– СПб.,1996.

3. *Кириллов Н.Г.* Концепция создания инфраструктуры производства сжиженного природного газа для городского автомобильного транспорта //Холодильная техника. 2002, №7.

4. *Кириллов Н.Г.* Машины Стирлинга для высокоэффективных и экологически чистых систем автономного энергоснабжения//Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2000. №12.

5. *Кириллов Н.Г.* Новые технологии в производстве холода: холодильные машины Стирлинга умеренного холода//Индустрия. 2002. № 2(28).

6. *Кириллов Н.Г.* Пилотный проект высокоэффективной и экологически чистой холодильной установки на основе машины Стирлинга для подвижного ракетного комплекса типа "Тополь"//Сб. трудов ВНК ВИКУ им. А.Ф. Можайского. Т.2. МО РФ. 2000.

7. *Кириллов Н.Г.* Применение высокоэффективных и экологически чистых машин Стирлинга в судовой энергетике//Труды 2-й Межд. конфер. по морским интеллектуальным технологиям «Моринтех-97». Т.5.– СПб. 1997.

8. *Кириллов Н.Г.* Результаты экспериментальных исследований холодильной машины Стирлинга умеренного холода//Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2001. №11.

9. *Кириллов Н.Г.* Стирлинг-технологии на службе автотранспорта // Холодильная техника. 2002. №10.

10. *Кириллов Н.Г., Сударь Ю.М.* и др. Децентрализованные системы теплоснабжения с тепловыми насосами, работающими по обратному циклу Стирлинга//Информационный бюллетень. «Теплоэнергетические технологии». 1997. №1.

11. *Kagawa N.* Regenerative Thermal Machines (Stirling Vuilleumier Cycle Machines) for Heating and Cooling// International Institute of Refrigeration, 2000.