

# ДВИГАТЕЛИ СТИРЛИНГА

Анатолий Семёнович Демидов, д.т.н., профессор кафедры конструкций и проектирования двигателей, Московский авиационный институт МАИ (национальный исследовательский университет),



Рис. 1 Роберт Стирлинг

*Журнал "Двигатель" не в первый раз обращается к двигателю с внешним подогревом, изобретённому Стирлингом. Эта тема была в журнале 2005-2 "Двигатель шотландского пастора", 2007-4 "Двигатель Стирлинга с жидкими поршнями", а также ряде сообщений. Но в таком основательном виде мы её ещё не затрагивали. Полагаем, это будет небезинтересно нашим читателям.*

В настоящее время известно большое количество типов двигателей, к которым относится это название [1,2], но обычно такими называют бесклапанные двигатели с внешним подводом тепла, работающие по замкнутому циклу. В качестве рабочего тела используется один из трех газов: воздух, гелий или водород. Критериями выбора рабочего тела являются доступность, величина коэффициента теплоотдачи и вязкость, от которой зависят гидравлические потери.

Считается, что двигатель был изобретен в 1816 году шот-

ландским священником Робертом Стирлингом. Естественно, рабочим телом двигателя был воздух. Схема двигателя так называемой гамма-конфигурации (вариант, называемый также двигателем Хейнричи) показана на рис.3. Остановимся вкратце на описании его устройства и работы. Вытеснительный и рабочий поршни связаны с коленчатым валом, но рабочий установлен в своем цилиндре с минимальным зазором, а вытеснительный с большим. Подвод тепла производится к полусферической головке вытеснительного цилиндра. Цикличность работы осуществляется следующим образом. При движении вытеснительного поршня вверх нагретый от стенок воздуха обтекает поршень, проходит в нижнюю часть цилиндра, затем через соединительный канал попадает под днище рабочего поршня и давит на него, заставляя поршень перемещаться вниз, вращая коленчатый вал. При этом воздух охлаждается, отдавая тепло стенкам рабочего цилиндра, а давление его падает. К моменту достижения рабочим поршнем нижней мертвой точки вытеснительный поршень начинает движение вниз, освобождая пространство в горячей (верхней) зоне своего цилиндра. Туда перетекает охлажденный воздух из рабочего цилиндра, там нагревается и цикл повторяется. Давления над и под вытеснительным поршнем практически не отличаются, потери связаны только с обтеканием поршня. Так выглядит упрощенное объяснение работы ДС. Диаграммы состояния идеального цикла Стирлинга показаны на рис. 4. Доказано, что реализация такого цикла возможна только при прерывистом движении поршней и хотя создание соответствующего механизма возможно, достигнутые преимущества могут быть сведены на нет низким общим КПД такого механизма.

О реальных достоинствах ДС будет сказано ниже. В двигателе можно выделить три зоны: нагреватель, регенератор и холодильник. В нашем случае нагревателем служит горячая часть вытеснительного цилиндра, холодильником - стенки рабочего цилиндра, а регенератором - канал, связывающий эти цилиндры. На самом деле рабочий процесс в ДС является очень сложным и до сих пор недостаточно изученным. В первую очередь это связано с тем, что все процессы теплообмена, происходящие в двигателе, по своей природе быстротечны. Прогресс в изучении ряда вопросов был существенным и произошел в 60-х годах прошлого века при использовании моделирующих программ и применении компьютерной техники для изображения траекторий частиц рабочего тела. Следствием всего вышесказанного явилось появление за 200 последних лет большого количества модификаций и названий двигателя, связанных в основном с именами изобретателей или фирм производителей. К ним относятся такие названия, как уже упоминавшийся двигатель Хейнричи, двигатели Робинсона, Эриксона и др. Как указывает Г. Уокер, название "двигатель Стирлинга" является обобщенным для большого семейства двигателей, различающихся по своим функциям, характеристикам и конструктивным схемам. Они способны работать как двигатели, тепловые насосы (для которых необходим подвод механической энергии), холодильные установки и генераторы давления. В настоящее время одной из самых популярных конструктивных схем двигателя является та, где рабочий и вытеснительный поршни находятся в одном цилиндре и связаны ромбическим приводом (рис. 5). Для преобразования возвратно-поступательного движения рабочего поршня во вращательное вала чаще всего используются ромбический механизм, кося шайба и кривошипно-шатунный механизм. Привод с кося шайбой неоднократно применялся на автомобильных ДС. Им можно пользоваться, в частности, для изменения мощности двигателя. Ромбический механизм, разработанный фирмой "Филипс" в 50-е годы прошлого

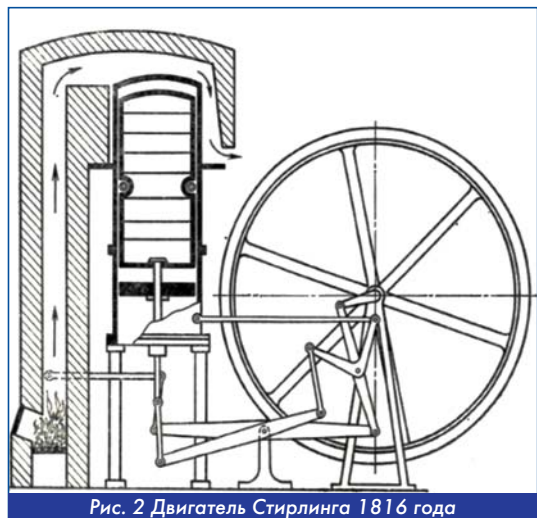


Рис. 2 Двигатель Стирлинга 1816 года

ландским священником Робертом Стирлингом. Естественно, рабочим телом двигателя был воздух. Схема двигателя так называемой гамма-конфигурации (вариант, называемый также двигателем Хейнричи) показана на рис.3. Остановимся вкратце на описании его устройства и работы. Вытеснительный и рабочий поршни связаны с коленчатым валом, но рабочий установлен в своем цилиндре с минимальным зазором, а вытеснительный с большим. Подвод тепла производится к полусферической головке вытеснительного цилиндра. Цикличность работы осуществляется следующим образом. При движении вытеснительного поршня вверх нагретый от стенок воздуха обтекает поршень, проходит в нижнюю часть цилиндра, затем через соединительный канал попадает под днище рабочего поршня и давит на него, заставляя поршень перемещаться вниз, вращая коленчатый вал. При этом воздух охлаждается, отдавая тепло стенкам рабочего цилиндра, а давление его падает. К моменту достижения рабочим поршнем нижней мертвой точки вытеснительный поршень начинает движение вниз, освобождая пространство в горячей (верхней) зоне своего цилиндра. Туда перетекает охлажденный воздух из рабочего цилиндра, там нагревается и цикл повторяется. Давления над и под вытеснительным поршнем практически не отличаются, потери связаны только с обтеканием поршня. Так выглядит упрощенное объяснение работы ДС. Диаграммы состояния идеального цикла Стирлинга показаны на рис. 4. Доказано, что реализация такого цикла возможна только при прерывистом движении поршней и хотя создание соответствующего механизма возможно, достигнутые преимущества могут быть сведены на нет низким общим КПД такого механизма.

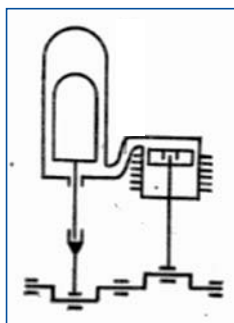


Рис. 3 "Гамма-конфигурация" двигателя Стирлинга с рабочим и вытеснительным поршнями



Рис. 4 Термодинамические диаграммы состояния идеального цикла двигателя Стирлинга

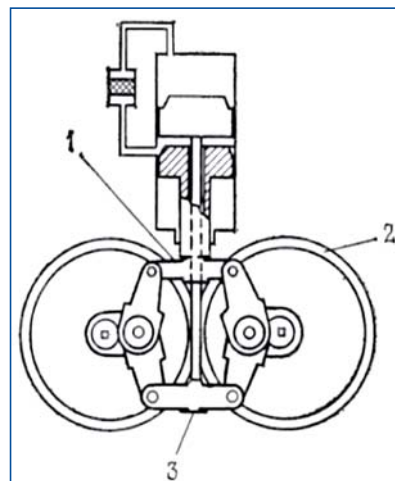


Рис. 5 "Ромбический привод" двигателя Стирлинга:  
1 - траверса рабочего поршня,  
2- синхронизирующее зубчатое колесо,  
3 - траверса вытеснительного поршня

века, дает возможность динамической балансировки даже в случае одноцилиндрового двигателя. Балансировка осуществляется за счет подбора весов рабочего и вытеснительного поршней, их штоков и траверс.

**Отметим основные особенности ДС:**

- 1) Двигатель представляет собой поршневую машину с внешним подводом тепла от любого источника.
- 2) Рабочее тело находится в замкнутом пространстве и во время работы не заменяется. В некоторых случаях может быть предусмотрена возможность добавления рабочего тела из-за утечек.
- 3) Идеальный термодинамический цикл Стирлинга имеет термический КПД, равный КПД цикла Карно.
- 4) Двигатель может работать с высоким КПД (до 40%) только при наличии эффективного регенератора.
- 5) Полезная работа совершается при попеременном сжатии и расширении рабочего тела при различных температурах.
- 6) Полезная работа практически прямо пропорциональна среднему давлению цикла. В наиболее мощных машинах оно достигает 20 МПа и более, что приводит к их пониженным массовым характеристикам.
- 7) Пуск некоторых видов двигателей может осуществляться без специальных пусковых устройств.
- 8) Для управления мощностью используются следующие способы: а/регулирование среднего давления цикла; б/регулирование "мертвого объема", то есть суммарного объема полостей, из которых газ не вытесняется при движении рабочего поршня; в/регулирование путем изменения фазового угла, т.е. угла отставания кривошипа рабочего поршня от кривошипа поршня вытеснительного (в машинах с коленчатым валом), а также др. способы.
- 9) На КПД двигателя существенным образом влияют теплогидравлические характеристики рабочего тела. Для двигателей с высокими характеристиками по КПД и оборотам целесообразно использовать водород, во вторую очередь - гелий. Воздух вследствие своей доступности как рабочее тело может иметь существенные преимущества только для двигателей невысокой литровой мощности и невысокой частоты вращения.
- 10) Надежность и долговечность ДС зависят от чистоты встроенных теплообменников, которые должны работать в среде, не содержащей масел, и, следовательно, от системы уплотнений. Для того, чтобы удельная мощность ДС была не ниже, чем у дизельных двигателей, среднее давление цикла должно составлять 10 - 20 МПа. Это создает серьезную нагрузку на систему уплотнений.
- 11) Благодаря отсутствию клапанного механизма и периодических вспышек рабочей смеси (как в двигателях внутреннего сгорания - ДВС) ДС является практически бесшумным.
- 12) По массовым характеристикам на единицу мощности ДС сопоставим с дизельным двигателем с турбонаддувом.
- 13) Стоимость изготовления ДС выше стоимости изготовления ДВС, однако стоимость его эксплуатации ниже.

В компоновочной модификации "альфа", предложенной Райдером, в каждом цилиндре находится только один поршень, выполняющий функции как рабочего, так и вытеснительного (рис.6). Рабочее тело заключено между верхней поверхностью

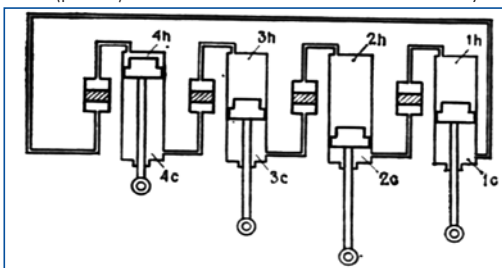


Рис. 6 Двигатель Стирлинга, работающий по принципу "Двойного действия" (Модификация Райдера)

одного поршня и нижней поверхностью другого, находящихся в соседних цилиндрах. В схеме, показанной на рис. 6, протекают одновременно четыре цикла: 1)1h - 2c; 2)2h - 3c; 3)3h - 4c; 4)4h - 1c. При реализации этой

схемы наиболее компактной является соосная компоновка (рис. 7), в которой удобно использовать общую систему подогрева рабочего тела, каналы, связывающие смежные цилиндры, оказываются одинаковыми по длине, и хорошо komponуются механизмы привода. В качестве уплотнений в ДС применялись как кольца типа поршневых, так и другие варианты.

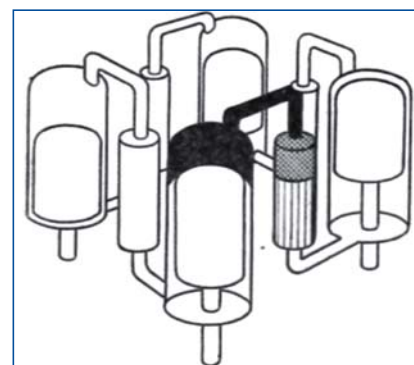


Рис. 7 Соосная конфигурация двигателя Стирлинга двойного действия

Одним из самых эффективных оказалось уплотнение типа "скатывающийся чулок", изобретенное на фирме "Филипс" и представляющее собой резиновую диафрагму (рис.8). Для уменьшения на нее давления масла в устройстве используется система его подкачки и регулировочный клапан. Более простым в производстве и надежным оказалось все-таки скользящее уплотнение, размещаемое также вокруг штока поршня (инженеры фирмы "Юнайтед Стирлинг" назвали его ленинградским на основании соответствующей публикации Ленинградского государственного университета). Оно представляет собой обойму, внутри которой находится уплотнительное разрезное кольцо, его защитный колпачок и два масляных кольца. Система уплотнений в ДС обеспечивает пониженное давление в картере, что позволяет иметь в нем более тонкие стенки и соответствующие массовые характеристики. Для оценки мощности ДС можно использовать формулу, которую Г.Уокер вывел из соотношения Била (Beale):

$$N = (z \times \beta_E \times V_{SP} \times p_{cp} \times n) / 6000,$$

где N - мощность [кВт],

z - число отдельных термодинамических циклов,

$V_{SP}$  - рабочий объем полости сжатия в одном цилиндре [см<sup>3</sup>],

$p_{cp}$  - среднее давление цикла [МПа],

n - скорость вращения вала [об / мин],

$\beta_E = (0,034 - 0,052 \xi)$  - так называемое число Била, в котором  $\xi$  представляет собой отношение температуры холодильника к температуре нагревателя (в градусах Кельвина).

С момента изобретения ДС прошло уже 200 лет и за это время двигатели нашли применение во многих областях техники. Разработки велись, кроме вышеупомянутых, такими известными фирмами, как "Дженерал Моторс", MAN/MWM и многими другими. В Советском Союзе были попытки использовать ДС в составе энергоустановок с солнечными зеркалами в южных республиках. В 60-х годах и позже работы в этом направлении велись также на кафедре 208 Московского авиационного института. Солнечное зеркало-концентратор "погибло" при уборке территории университета летом 2017 года, а приводной редуктор зеркала был отправлен в музей института №2 (бывшего 2-го факультета). В одной из публикаций "Вестника Московского авиационного института" сотрудниками кафедры 203 МАИ был предложен способ повышения мощности ДС путем заключения его вместе с электрогенератором в герметичный кожух, заполненный газом высокого давления [3]. Отметим наиболее интересные разработки фирмы "Филипс". С 1952 по 1954 годы было произведено около 100 двигателей типа 102С, которые выпускались в одном блоке с электрогене-

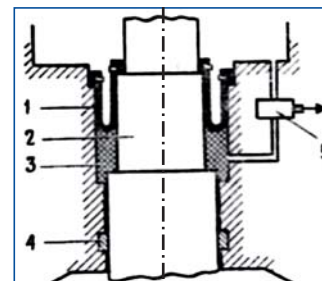


Рис. 8 Уплотнение типа "Скатывающийся чулок" 1 - резиновая манжета типа "скатывающийся чулок", 2 - шток поршня, 3 - масляная подушка, 4 - нагнетательное масляное кольцо, 5 - клапан, регулирующий давление масла.

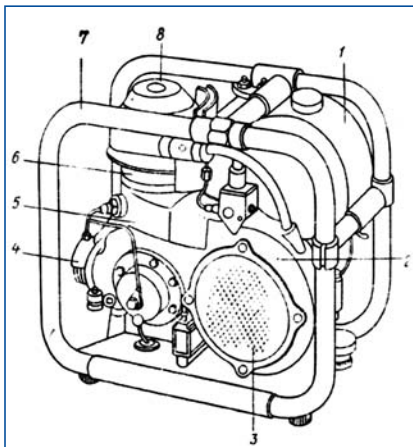


Рис. 9 Электрогенераторный блок с двигателем Стирлинга фирмы "Филипп"  
1 - топливный бак, 2 - магистраль охлаждающего воздуха, 3 - вентилятор, 4 - компрессор, 5 - холодильник, 6 - цилиндр двигателя, 7 - рама, 8 - нагреватель

гателях, предназначенных для автомобилей, автобусов, локомотивов и морских судов, в качестве рабочего тела использовались водород или гелий. Например, четырехцилиндровый двигатель для локомотива с ромбическим приводом фирмы "Филипп" на водороде имел мощность до 295 кВт и массу 3175 кг. Среднее давление рабочего тела составляло 13,8 МПа.

В обзоре, касающемся двигателей Стирлинга, нельзя исключить вопроса об их применении в области создания искусственного сердца. Специалисты подсчитали, что полезная гидравлическая мощность циркуляционного насоса, перекачивающего кровь, очень невелика и составляет всего 3 - 5 Вт. В качестве источников энергии рассматриваются либо электрический (аккумулятор), либо изотопный (обычно на плутонии-238). Понятно, что при реализации второго варианта это неизбежно вызовет серьезные возражения общественности, поскольку придется решать не только проблемы безопасности, но также этические и юридические. Отметим, что тепловая мощность необходимого изотопного источника составляет в среднем около 30 Вт, что требует 54 грамм плутония. В качестве преобразователя тепловой энергии в механическую чаще всего рассматривается двигатель Эриксона или двигатель Стирлинга. В США работы в этой области ведутся с 1964 года и там достигнуты серьезные успехи. Здесь отметим лишь один интересный факт: в регенераторе двигателя Эриксона

применялась набивка из полых тонкостенных стеклянных

"соломинок" диаметром около 0,02" и менее. Выбор такого материала был обусловлен его инертностью по отношению к рабочему телу - гелию.

Не останавливаясь здесь на очевидных достоинствах применения ДС различного типа в качестве автономных источников энергии с различными источниками тепла для сельской местности и в полевых условиях, обратимся к возможности их применения в космосе. На фирме "Аллисон" в качестве исходного прототипа был создан и испытан одноцилиндровый ДС с ромбическим приводом [4]. К приводу были присоединены два

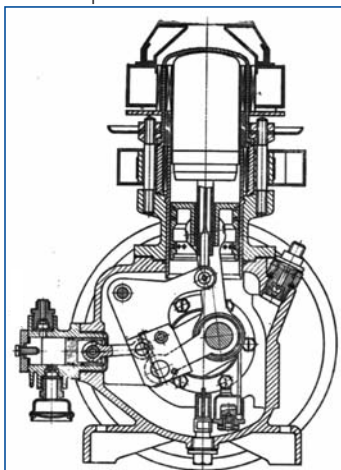


Рис. 10 Разрез двигателя Стирлинга фирмы "Филипп"

электрогенератора мощностью 4 кВт. Подвод тепла в космосе должен был осуществляться от солнечного концентратора, рабочим телом являлся гелий при среднем давлении 10 МПа.

роторами (рис. 9). Такие блоки могли использоваться для питания радиоаппаратуры. По другим данным было выпущено несколько сотен таких блоков, но из-за низкого спроса их производство прекратилось. На рис. 10 показан поперечный разрез этого двигателя с водяной системой охлаждения вместо воздушной. Моторная лодка с таким двигателем мощностью 2 кВт развивала скорость до 4,6 м/с. В состав двигателя входил компрессор для подкачки воздуха.

В более мощных двигателях, предназначенных для автомобилей, автобусов, локомотивов и морских судов, в качестве рабочего тела использовались водород или гелий. Например, четырехцилиндровый двигатель для локомотива с ромбическим приводом фирмы "Филипп" на водороде имел мощность до 295 кВт и массу 3175 кг. Среднее давление рабочего тела составляло 13,8 МПа.

Космический вариант энергоустановки создан не был. Предполагается, что разработчикам не удалось решить проблему смазки, поскольку в условиях невесомости масло рассеивается в виде тумана во всем доступном ему пространстве. Оно неизбежно должно попасть в полость регенератора и коксоваться там, резко снижая эффект регенерации и общий КПД. Выходом из положения является отказ от применения жидкой смазки и переход к свободнопоршневому типу двигателя Стирлинга в сочетании с линейным электрическим генератором (СПДС ЛГ). Его схема показана на рис.11 [5]. В таком двигателе коленчатый вал отсутствует, а роль маховика выполняет газ в буферной полости. В кольцевой проточке поршня-якоря установлены постоянные магниты, в статоре вокруг него располагаются обмотки генератора переменного тока. В космосе наиболее целесообразным вследствие его хорошей уравновешенности является использование двухцилиндрового двигателя оппозитной схемы, в котором движения поршней синхронизированы. С 2001 года энергоустановки с такими двигателями разрабатываются в США несколькими фирмами на конкурсной основе с такими характеристиками:

Тепловая мощность изотопного источника	235 Вт
Электрическая мощность генератора	110 Вт
Частота тока	82 Гц
Среднее давление гелия	2,5 МПа
Максимальная температура р. т.	650°С
Минимальная температура р. т.	80°С
Ход поршня-якоря	6 мм

Ресурс в 100000 часов должен быть обеспечен бесконтактными газовыми подшипниками, материалами электрической изоляции и постоянных магнитов. Энергоустановку намечено использовать на марсианском бездеходе. Добавим, что перспективными для подобных СПДС ЛГ могут быть также АЭМП - активные электромагнитные подшипники. На кафедре конструкции и проектирования двигателей студенты некоторых специальностей института №2 МАИ при выполнении курсовых и дипломных проектов получают близкие по характеристикам задания.

Заканчивая эту статью, осмелимся сделать некоторые прогнозы в отношении применения ДС на ближайшие 10 - 20 лет. Двигатели Стирлинга могут занимать свои не слишком обширные, но определенные ниши в областях:

- космической энергетики;
- производства автомобилей с гибридными двигателями;
- производства автономных энергоузлов;
- производства малогабаритных двигателей для учебных целей и моделлистов.

Литература

- 1.Уокер Г. Двигатели Стирлинга. - М.: Машиностроение, 1985. - 405 с.
- 2.Ридер Г, Хупер Ч. Двигатели Стирлинга. - М.: Мир, 1986. - 464 с.
- 3.Демидов А.С., Марагинский Р.Н., Соколовская Е.В. Двигатель Стирлинга с герметичным охлаждаемым картером. Вестник Московского авиационного института, 1999. Том 6. №1. - С. 28-31.
- 4.Фаворский О.Н., Фишгойт В.В., Янтовский Е.И. Основы теории космических электрореактивных двигательных установок. - М.: Высшая школа, 1970. - 486 с.
- 5.Космические ядерные энергоустановки и электроракетные двигатели. Конструкция и расчет деталей / Под ред. П.В. Андреева. - М.: Изд-во МАИ, 2014. - 507 с.

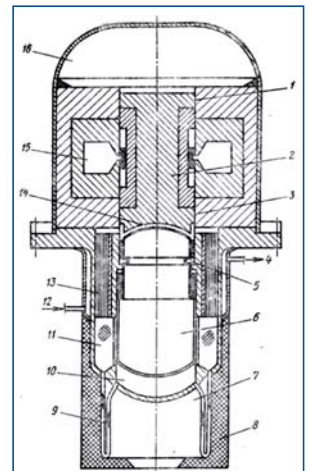


Рис. 11 Свободнопоршневой двигатель Стирлинга с линейным электрогенератором  
1 и 3 - газовые опоры скольжения; 4 - отвод охладителя; 5 - упругая газовая подушка вытеснителя; 6 - вытеснитель; 7 - полость поглотителя солнечной энергии; 8 - изоляция; 9 - трубка нагревателя; 10 - полость расширения; 11 - регенератор; 12 - подвод охладителя; 13 - холодильник; 14 - полость сжатия; 15 - линейный генератор; 16 - упругая газовая подушка поршня

