

М.Д.КУЗНЕЦОВ, студент, 8 960-242-08-92
Санкт-Петербургский государственный горный университет

M.D.KUZNETSOV, student, 8 960-242-08-92
Saint Petersburg State Mining University

ОСОБЕННОСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНЕШНЕГО СГОРАНИЯ – ДВИГАТЕЛЕЙ СТИРЛИНГА

В статье рассмотрены особенности двигателей Стирлинга. Кратко изложена история создания и развития. Описывается цикл Стирлинга, его сравнение с циклом Карно, а также основные типы конструкций.

Ключевые слова: цикл Стирлинга, двигатель Стирлинга, двигатель внешнего сгорания, цикл Карно, Джон Эрикссон, термический КПД.

PECULIARITIES OF EXTERNAL COMBUSTION ENGINES – STIRLING ENGINES

This article discusses the peculiarities of Stirling engines. Summarized history of the creation and development. Stirling cycle is described, and its comparison with the Carnot cycle, as well as the main types of structures.

Key words: Stirling cycle, Stirling engine, external combustion engine, Carnot cycle, John Ericsson, thermal efficiency.

Загрязнение окружающей среды, перенаселение планеты, ограниченность природных ресурсов, поиски альтернативных источников энергии – проблемы, которые необходимо решить в новое тысячелетие. Ученые пытаются придумать что-то новое, хотя ответ уже давно есть.

Все началось приблизительно в 1816 г. Робертом Стирлингом, священником из Шотландии, был изобретен тепловой двигатель с регенерацией, работавший по замкнутому циклу. Позднее шведский изобретатель Джон Эрикссон, работавший в Англии, сконструировал регенеративный тепловой двигатель открытого цикла. Впоследствии в течение всего XIX в. в Англии, Европе и США широко использовались тысячи подобных двигателей самых разнообразных форм и габаритов. Они были надежными, достаточно эффективными и, что самое важное, безопасными по сравнению с современными паровыми машинами. Но в середине XIX в.

был изобретен двигатель внутреннего сгорания; его последующее развитие в виде бензиновых двигателей и дизелей наряду с изобретенным в это же время электродвигателем явилось причиной резкого уменьшения использования двигателей Стирлинга. Однако в конце 30-х годов в Эйндховене в лабораториях фирмы «Филипс» было положено начало исследовательских работ по двигателям Стирлинга, с этого момента в их развитии наблюдается непрерывный прогресс [1].

Машина, работающая по циклу Стирлинга, представляет собой устройство с замкнутым термодинамическим регенеративным циклом, в котором циклические процессы сжатия и расширения осуществляются при различных уровнях температуры, а управление потоком рабочего тела происходит путем изменения его объема; на этом принципе основано превращение теплоты в работу или наоборот [2].

Рассмотрим цикл Стирлинга и сравним его с циклом Карно.

Цикл Стирлинга (рис.1) в некотором отношении более прост, чем известный цикл Карно. Цилиндр имеет два противоположно расположенных поршня с помещенным между ними регенератором [3]. Регенератор представляет собой термодинамическую «губку», обладающую способностью поочередно поглощать и отдавать теплоту. Металлическая насадка состоит из отдельных тонких проволочек или полосок. Один из двух объемов, расположенный между регенератором и поршнями, – полость расширения – находится при высокой температуре T_{\max} . Другой объем – полость сжатия – имеет низкую температуру T_{\min} , следовательно, температурный градиент между торцевыми поверхностями регенератора равен $T_{\max}-T_{\min}$. В продольном направлении предполагается, что материал насадки имеет нулевую теплопроводность, т.е. движение поршней происходит без трения и без утечек рабочего тела, находящегося между поршнями.

Предположим, что в начале цикла поршень полости сжатия располагается в верхней мертвой точке, а поршень полости расширения – в нижней, около торцевой поверхности регенератора. В таком положении все рабочее тело находится в холодной полости сжатия. Его объем максимальный, а давление и температура минимальные; это соответствует точке 1 на pV - и TS -диаграммах (рис.1). Во время процесса сжатия 1-2 правый поршень движется по направлению к нижней мертвой точке, а поршень полости расширения остается неподвижным. Рабочее тело сжимается в полости сжатия, и давление его увеличивается. Температура остается постоянной, так как теплота Q_c отводится от полости сжатия в окружающую среду.

В процессе 2-3 оба поршня движутся одновременно: поршень полости сжатия к регенератору, а поршень полости расширения – от регенератора. Движение поршней происходит таким образом, что объем между ними остается постоянным. Вследствие этого рабочее тело, проходя через пористую насадку регенератора, переходит из полости

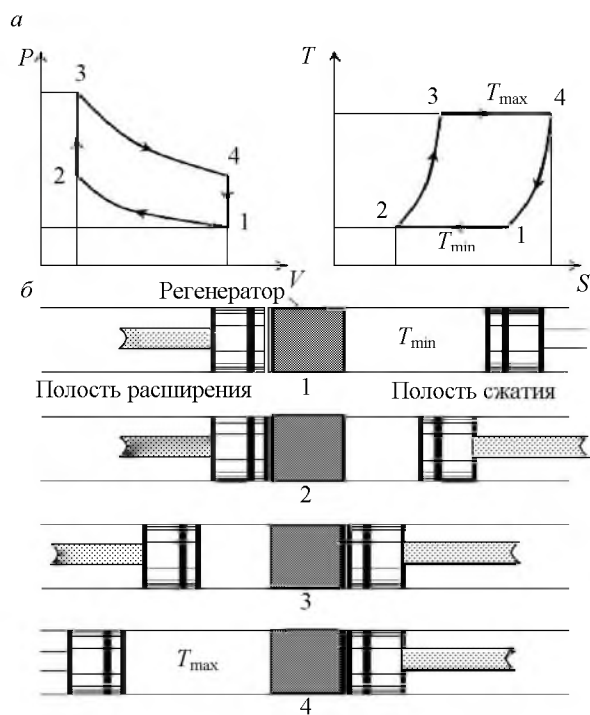


Рис.1. Цикл Стирлинга: а – pV - и TS -диаграммы; б – положение поршней в основных точках цикла (1-4)

сжатия в полость расширения. При прохождении через регенератор температура рабочего тела за счет теплоты насадки повышается от T_{\min} до T_{\max} . Постепенное увеличение температуры газа при прохождении его через насадку регенератора при постоянном объеме вызывает повышение его давления.

В процессе расширения 3-4 левый поршень продолжает двигаться от регенератора в направлении верхней мертвой точки; правый поршень полости сжатия остается неподвижным в нижней мертвой точке, вблизи регенератора. Поскольку это процесс расширения, то с увеличением объема газа давление его уменьшается. Температура рабочего тела остается постоянной, поскольку теплота Q_E подводится к системе от внешнего источника.

В последнем процессе (цикл 4-1) поршни движутся одновременно так, чтобы вернуть рабочее тело при постоянном объеме через насадку регенератора из полости расширения в полость сжатия. При прохождении газа через насадку регенератора теплота от рабочего тела передается материалу насадки и вследствие этого температура ра-

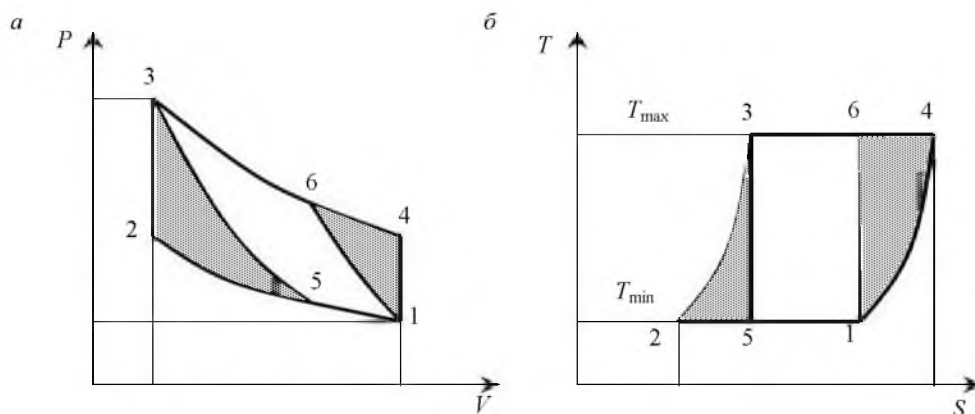


Рис.2. Циклы Стирлинга (а) и Карно (б)

бочего тела уменьшается и достигает T_{\min} – температуры полости сжатия. Теплота, переданная в этом процессе, сохраняется в насадке и передается рабочему телу в процессе 2-3 следующего цикла.

Таким образом, цикл состоит из четырех процессов: 1-2 – процесс изотермического сжатия, теплота от рабочего тела с T_{\min} передается окружающей среде; 2-3 – процесс при постоянном объеме, теплота от насадки регенератора передается рабочему телу; 3-4 – процесс изотермического расширения, теплота от внешнего источника с T_{\max} передается рабочему телу; 4-1 – процесс при постоянном объеме, теплота от рабочего тела передается насадке регенератора.

Если количество теплоты в процессах 2-3 и 4-1 одинаково, то теплообмен между двигателем и окружающей средой осуществляется путем подвода и отвода теплоты соответственно при T_{\max} и T_{\min} . Такие условия подвода и отвода теплоты при постоянной температуре удовлетворяют выводам второго закона термодинамики для максимального термического КПД цикла. Вследствие этого термический коэффициент полезного действия цикла Стирлинга такой же, как и для цикла Карно: $\eta = (T_{\max} - T_{\min}) / T_{\max}$ [3]. Основное преимущество цикла Стирлинга состоит в замене двух изотропических процессов двумя процессами при постоянном объеме, что существенно увеличивает площадь на pV -диаграмме. Поэтому для получения достаточной работы в цикле Стирлинга не требуется создавать очень высокие значения давления и вытесняемых объемов, как в случае цикла Карно.

Сравнение pV -диаграмм циклов Карно и Стирлинга для заданного давления, температуры и объема приведено на рис.2 [1]. Заштрихованные площади 5-2-3 и 1-6-4 представляют дополнительную работу, полученную вследствие замены изотропических процессов процессами при постоянном объеме. Изотермические процессы 1-5 и 3-6 цикла Карно (рис.2, б) продлены, чтобы получить процессы 1-2 и 3-4. Таким образом, количество подводимой и отводимой теплоты в цикле Стирлинга увеличивается пропорционально полученной работе. Доля подводимой теплоты, превращенной в работу (термический КПД цикла), одинакова для обоих циклов.

Как правило, в прикладной термодинамике отмечается особенность цикла Карно как некой идеализированной системы, не имеющей практического применения, но обладающей наивысшей термической эффективностью. В сущности непонятно существует бесконечное число термодинамических циклов с такой же максимальной термической эффективностью. Все эти циклы должны иметь различные регенеративные процессы теплообмена и изотермические процессы подвода и отвода теплоты. Цикл Карно отличается от них тем, что в нем используются изотропические, а не регенеративные процессы теплообмена. К другому циклу относится цикл Стирлинга, в котором регенеративные процессы происходят соответственно при постоянных объеме и давлении.

Что касается конструкции, то все существующие компоновки машин Стирлинга могут быть классифицированы на две большие группы: двухпоршневые машины и

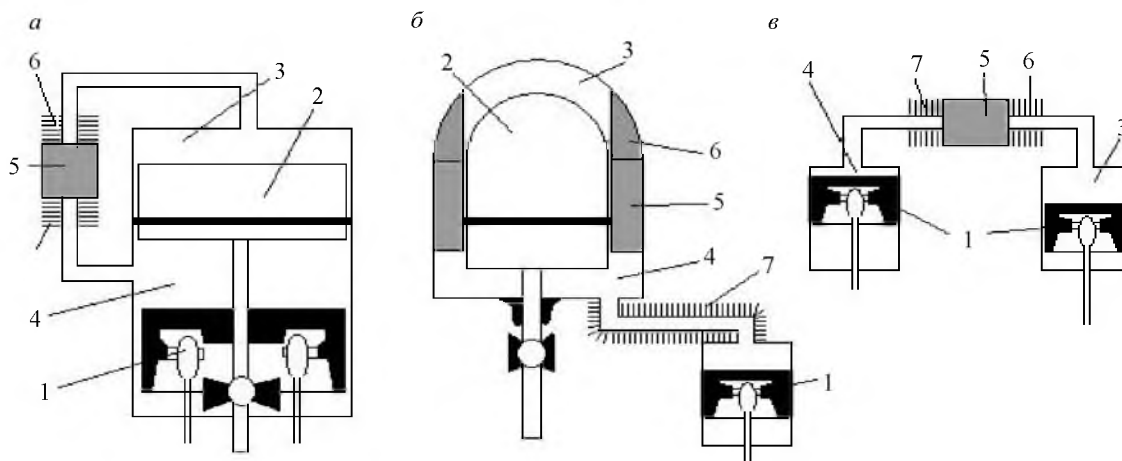


Рис.3. Три основные схемы, по которым может быть рассчитано большинство типов машин Стирлинга:
а – рабочий поршень и вытеснитель в одном цилиндре; *б* – рабочий поршень и вытеснитель в разных цилиндрах;
в – машина с двумя рабочими поршнями
 1 – рабочий поршень; 2 – вытеснитель; 3 – полость расширения; 4 – полость сжатия; 5 – регенератор; 6 – нагреватель; 7 – холодильник

машины вытеснительного типа. Машины из второй группы могут быть подразделены на машины, в которых рабочий и вытеснительный поршни находятся либо в одном, либо в разных цилиндрах. Примеры всех трех систем приведены на рис.3 [3].

Основное различие между рабочим поршнем и вытеснителем – в рабочем поршне для предотвращения утечек газа от одного торца к другому служит газонепроницаемое (теоретически) уплотнение. Поэтому без учета гидравлического сопротивления давление рабочего тела над и под вытеснителем одинаковое, и при возвратно-поступательном движении вытеснитель не влияет на газ, а лишь переталкивает газ из одной полости в другую. Для рабочего поршня давление рабочего тела, находящегося в полостях над и под поршнем, разное, за исключением мгновенных значений для некоторых точек цикла. При движении рабочего поршня газ производит работу над поршнем либо наоборот.

Преимущество машин Стирлинга: возможность использовать в качестве рабочего тела различные газы (кислород, воздух, нейтральные газы); отсутствие вибраций; бесшумность; простота конструкции; экологичность и повышенный ресурс работы. К недостаткам можно отнести материалоемкость

и трудность быстрого изменения мощности, что не мешает использовать двигатели в солнечных батареях, подводных лодках, высокоэффективных криогенных машинах, а также рассматривать для привода генераторов обитаемой лунной базы [2].

На кафедре горных транспортных машин проводятся исследования двигателей внешнего сгорания Стирлинга. Разработан экспериментальный стенд. Основной задачей экспериментальных исследований является определение условий работы модельного образца Стирлинг-машины, при которых обеспечивается максимальное значение термического КПД.

ЛИТЕРАТУРА

1. Двигатели Стирлинга / Под ред. М.Г.Круглова. М., 1977. 150 с.
2. Ридер Г. Двигатели Стирлинга / Г.Ридер, Ч.Хупер. / Пер. с англ. М., 1986. 464 с.
3. Уокер Г. Машины, работающие по циклу Стирлинга / Пер. с англ. М., 1978. 152 с.

REFERENCES

1. Stirling Engines / Edited M.G.Kruglov. Moscow, 1977. 150 p.
2. Reader G., Hooper C. Stirling Engines. Moscow, 1986. 464 p.
3. Walker G. Stirling-cycle Machines. Moscow, 1978. 152 p.

Научный руководитель д-р техн. наук, профессор В.И.Александров