

ДВИГАТЕЛИ С ВНЕШНИМ ПОДВОДОМ ТЕПЛОТЫ

В.П. Бреусов, д. т. н.; М.И. Куколев, д. т. н.; С.Н. Вильдяева; А.Ю. Абакшин
ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

(Продолжение, начало в № 3)

Принцип работы двигателя внешнего сгорания

Принцип действия многих тепловых двигателей состоит в том, что при расширении нагретого газа совершается большая механическая работа, чем при сжатии холодного газа.

Сжатие, нагрев, расширение, охлаждение — вот четыре основных процесса, необходимых для функционирования теплового двигателя. Каждый из вышеперечисленных процессов можно проводить различными путями.

Охлаждение и нагрев газа могут протекать при постоянном объеме (изохорный процесс) или при переменном объеме и постоянном давлении (изобарный процесс). Сжатие и расширение газа могут происходить при постоянной температуре (изотермический процесс) или без теплообмена с окружающей средой (адиабатический процесс). Строя замкнутые циклы из различных комбинаций этих процессов, нетрудно получить теоретические циклы, по которым работают все современные тепловые двигатели.

Комбинация из двух адиабат и двух изохор образует теоретический цикл бензинового двигателя (двигатель Отто). Заменяя в этой комбинации изохору, по которой идет нагревание газа на изобару, получим цикл дизельного двигателя (двигатель Дизеля). Две адиабаты и две изобары дадут теоретический цикл газовой турбины.

Среди возможных термодинамических циклов комбинация из двух адиабат и двух изотерм играет особо важную роль в термодинамике. По такому циклу (циклу Карно) должен работать двигатель, имеющий самый высокий КПД для данного интервала температур. Двигатели, работающие по другим циклам, гораздо менее экономичны. Теоретические КПД регенеративных двигателей (Стирлинга и Эриксона) могут быть приближены к КПД цикла Карно.

В реальности созданные конструкции двигателей работают по циклам, отличающимся от теоретических. Так, можно предположить, что процесс подвода теплоты (от регенератора и нагревателя) происходит не при постоянной температуре, а при постоянном объеме (в начальной фазе) и при постоянном давлении (в более поздней фазе). Далее рабочее тело расширяется по линии, достаточно приближенной к адиабате. Те же соображения можно высказать и в

отношении процесса отвода теплоты. Учитывая, что он протекает при существенно меньших температурном уровне и общем тепловом потоке, отклонение от изотермы выражено гораздо в меньшей степени. Согласно теоретическим расчетам, КПД двигателей внешнего сгорания может достигать 70 %.

Двигатель Стирлинга может работать на любых видах топлива: жидкого, твердого, газообразного, ядерного и радиоизотопного, от излучения Солнца. Перспективно объединение нагревателя двигателя и теплового накопителя.

Применение водорода или гелия в качестве рабочего тела в замкнутом цикле позволило современным машинам настолько снизить габариты и интенсифицировать теплообмен в нагревателе, что двигатели стали компактными.

Особенность двигателей Стирлинга заключена еще и в том, что это обратимая машина. Если от постороннего источника энергии вращать вал двигателя, то последний становится высокоэффективной холодильной машиной.

На первый взгляд трудно предположить, что в тепловых двигателях с внешним подводом теплоты заложены какие-либо возможности, позволяющие им конкурировать с двигателями внутреннего сгорания хотя бы по экономичности. В двигателях внешнего сгорания топливо сжигается вне рабочего цилиндра и теплота подводится к рабочему телу через стенку цилиндра. Наивысшая температура цикла ограничена опеределенными значениями, связанными прежде всего со способностью конструкционных материалов работать при постоянном высоком нагреве. Казалось бы, ожидать какого-либо выигрыша и в размерах такого двигателя не следует. Циклы, по которым работают двигатели Стирлинга, состоят из двух изотерм и двух изохор (рис. 1, а). Достаточно построить диаграммы этих двигателей, чтобы убедиться, что при работе на атмосферном воздухе их размеры получаются огромными.

В реальности можно предположить, что процесс подвода теплоты (от регенератора и нагревателя) происходит не при постоянной температуре, а при постоянном объеме (в начальной фазе) и при постоянном давлении (в более поздней фазе). Далее рабочее тело расширяется по линии, достаточно приближенной к адиабате (рис. 1, б).

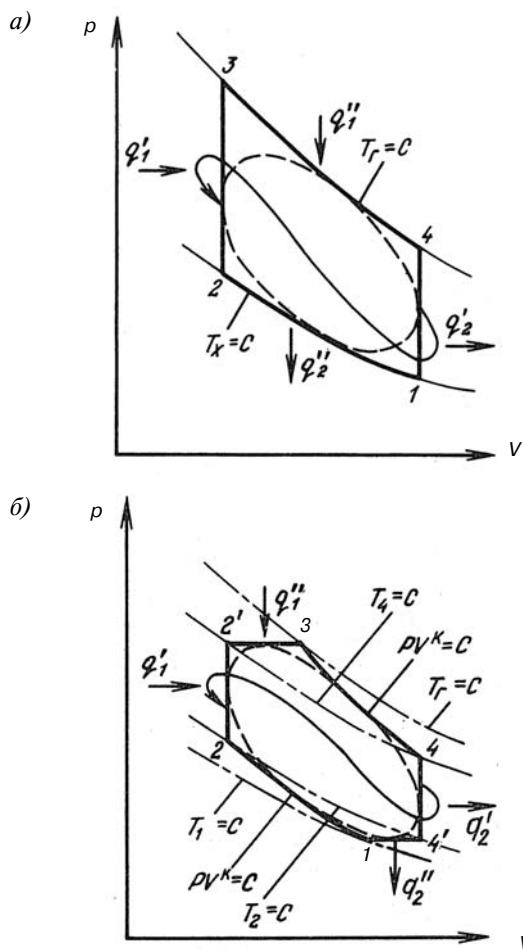


Рис. 1. Теоретический идеальный (а) и вариант реального (б) регенеративного цикла Стирлинга:

q — теплота; T — температура; p — давление; V — объем; k — показатель адиабаты; C — постоянная; 1 — подвод; 2 — отвод; г — нагреватель; х — охладитель

Те же соображения можно высказать и по отношению к процессу отвода теплоты. Учитывая, что он протекает при существенно меньших температурном уровне и общем тепловом потоке, отклонение от изотермы выражено гораздо в меньшей степени.

Хотя двигатель Стирлинга может работать и без регенератора, включение его в конструкцию придает всей системе уникальные свойства. Чтобы нагреть газообразное рабочее тело двигателя до определенной температуры при постоянном давлении, следует запастись в регенераторе больше теплоты, чем для нагрева рабочего тела при постоянном объеме. Охлаждение отработавшего расширившегося рабочего тела в регенераторе тоже происходит при постоянном давлении. Значит, здесь запасается ровно столько теплоты, сколько требуется для нагрева сжатого рабочего тела, идущего в рабочий цилиндр. Уже первые расчеты, произведенные специалистами фирмы «Филиппс» при проектировании двигателей Стирлинга, ошеломили создателей этих

машин: КПД двигателей внешнего сгорания может достигать 70 %.

В 1944 г. фирма запустила опытную модель Стирлинга. Правда, она показала КПД 39 %, но оказалась экономичнее газовой турбины с КПД 26 %, авиационного бензинового двигателя с КПД 28–30 % и лучших в то время дизелей с КПД 32–35 % (однако следует помнить — это была середина прошлого столетия).

Итак, основные особенности работы двигателя Стирлинга заключаются в следующем:

- в двигателе происходит преобразование теплоты в полезную работу посредством сжатия постоянного количества рабочего тела при низкой температуре и последующего (после периода нагрева) его расширения при высокой температуре. Поскольку работа, затрачиваемая поршнем на сжатие рабочего тела, меньше работы, которую поршень совершает при расширении рабочего тела, двигатель совершает полезную работу;

- при наличии регенерации необходимо только подводить теплоту, чтобы не допускать охлаждения рабочего тела при его расширении, и отводить теплоту, выделяющуюся при его сжатии;

- изменение температуры рабочего тела обеспечивается наличием разделенных холодной и горячей полостей двигателя, между которыми под действием движения поршней перемещается рабочее тело по соединительным каналам;

- изменения объема в этих двух полостях должны не совпадать по фазе, а получающиеся в результате циклические изменения суммарного объема, в свою очередь, не должны совпадать по фазе с циклическим изменением давления. Это — условие получения полезной работы на выходном валу двигателя.

Таким образом, принцип работы двигателя Стирлинга — это попеременный нагрев и охлаждение заключенного в изолированном пространстве рабочего тела. Однако нагрев в двигателе внешнего сгорания происходит за счет теплоты, подводимой к газу извне, через стенку цилиндра. Из-за низкой скорости теплопередачи от стенки цилиндра невозможно, естественно, нагреть или охладить газ с помощью быстрого нагрева или охлаждения самой стенки. Известно, что Роберт Стирлинг использовал периодическое изменение температуры газа, применяя вытеснительный поршень (вытеснитель). Вытеснитель заставляет перемещаться газ в одну из двух полостей цилиндра, одна из которых находится при постоянной низкой, а другая при постоянной высокой температуре.

Рабочая часть современного двигателя Стирлинга представляет собой замкнутый объем, заполненный газом (рис. 2).

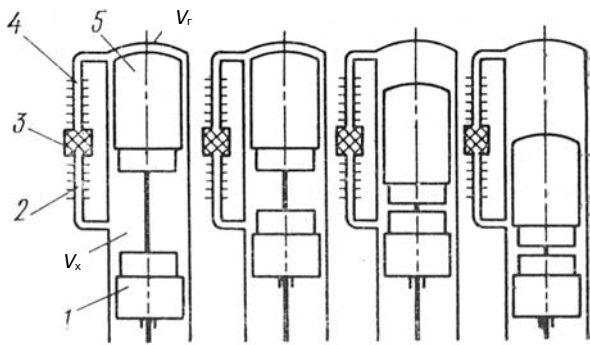


Рис. 2. Принцип работы двигателя Стирлинга:

1 — рабочий поршень; 2 — охладитель; 3 — регенератор; 4 — нагреватель; 5 — поршень-вытеснитель

Верхняя часть объема V_r — горячая, она непрерывно нагревается. Нижняя V_x — холодная, она все время охлаждается. В этом объеме находится цилиндр с двумя поршнями: поршнем-вытеснителем 5 и рабочим поршнем 1. Когда рабочий поршень движется вверх, газ в объеме сжимается, при движении поршня-вытеснителя вниз производится попеременное нагревание и охлаждение газа. Когда поршень-вытеснитель находится в верхнем положении в горячем пространстве V_r , большая часть газа оказывается вытесненной в холодное пространство V_x . В это время рабочий поршень начинает двигаться вверх и сжимает холодный газ. Теперь поршень-вытеснитель устремляется вниз почти до соприкосновения с рабочим поршнем, и сжатый холодный газ перекачивается в горячее пространство. Расширение нагреваемого газа — рабочий ход. Часть энергии рабочего хода запасается на последующее сжатие холодного газа, а избыток создает крутящий момент на валу двигателя.

Какова же роль регенератора в этом процессе? Регенератор 3 расположен между холодным и горячим пространствами. Когда расширившийся газ движением поршня-вытеснителя перекачивается в холодную часть, он проходит через плотную ткань (плотный пористый материал — сетка, проволока и т. п.) регенератора и отдает часть содержащейся в нем теплоты. Во время обратного хода сжатый холодный газ, прежде чем попасть в горячую полость (часть цилиндра), отбирает эту теплоту обратно.

Естественно, в реальной машине Стирлинга все выглядит не так просто. Невозможно быстро нагреть газ через сплошную стенку цилиндра, для этого необходимо весьма большая поверхность нагрева. Поэтому верхняя часть замкнутого объема представляет собой развитую систему специальных труб, нагреваемых теми или иными тепловыми источниками (например, пламенем

газовой горелки). Для полноты использования теплоты продуктов сгорания холодный воздух, подводимый к горелке, предварительно подогревается отработавшими газами — в связи с этим контур сгорания получается довольно сложным. Холодная часть рабочего объема представляет собой тоже конструктивно сложную систему.

Под рабочим поршнем находится замкнутая буферная полость, наполненная газом под давлением. Во время рабочего хода давление в этой полости повышается. Запасаемой при этом энергии достаточно для того, чтобы сжать холодный газ в рабочем объеме. Поскольку давление в цилиндре повышается плавно, а не скачкообразно, как в двигателях внутреннего сгорания, вибрации двигателей Стирлинга практически отсутствуют.

У этих двигателей нет карбюраторов, систем зажигания, клапанов, свечей. Им не нужны глушители, ведь они работают почти бесшумно. Качественное сгорание топлива в горелке снимает проблему выбросов вредных веществ. Но если это так, то почему же ни Стирлинг, ни Эрикссон не смогли добиться того успеха, которого заслуживали их изобретения?

Прежде всего, эти изобретатели не смогли полностью использовать достоинства своих регенераторов. Ведь науки о теплопередаче тогда просто не существовало. Произвести расчет регенератора было невозможно, поэтому его размеры и конструкция выбирались «на глазок», а КПД двигателя внешнего сгорания весьма сильно зависит от качества работы регенератора. И еще одна, не менее важная, причина заключалась в том, что ни Стирлинг, ни Эрикссон не делали свои машины замкнутыми. У того и у другого рабочим телом служил воздух, который засасывался в двигатель при атмосферном давлении, что весьма существенно отражалось на размерах машин при сравнительно малых мощностях.

Но самое удивительное и самое важное не в том, что КПД регенеративных «стирлингов» и «эриксонов» становятся равными. Главное в том, что они становятся равными КПД цикла Карно! А отсюда следует, что даже при 600–650 °С теоретический КПД двигателей внешнего сгорания составляет 70 %.

Поражает и тот факт, насколько гениальную и остроумную машину создал Роберт Стирлинг еще в XIX веке: принципиальная схема и кинематика ее рабочей части целиком переключались в современные модели. Инженеры лишь тщательно изучили процессы регенерации теплоты и предложили новые материалы для регенератора, доведя его эффективность до 95–97 %. Для увеличения мощности двигателя внешнего сго-

рания, а также улучшения компактности современные специалисты сделали рабочую часть двигателя изолированной от атмосферы и заполнили ее сжатым газом — гелием или водородом. Это позволило в настоящее время создавать двигатели внешнего сгорания, способные вступить в жесточайшую конкуренцию с двигателями внутреннего сгорания.

Классификация двигателей Стирлинга

По принципу действия можно выделить двигатели одностороннего (простого) и двойного действия.

В двигателях одностороннего действия две полости (сжатия и расширения), соединяемые теплообменниками, могут находиться в одном или в двух цилиндрах. В одноцилиндровых двигателях предусмотрены два поршня — рабочий и вытеснитель (рис. 3), а в двухцилиндровых — два рабочих или рабочий и вытеснительный. Каждая из компоновок представляет собой самостоятельные модули, из которых могут быть

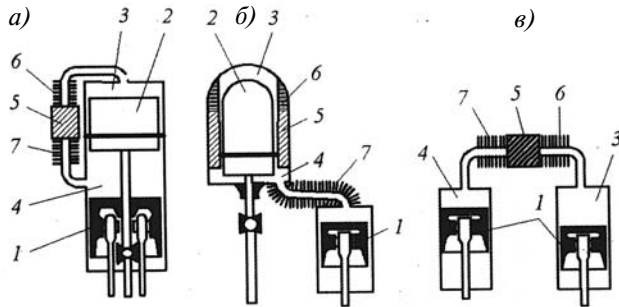


Рис. 3. Основные схемы двигателей Стирлинга одностороннего действия с рабочим поршнем и вытеснителем в одном цилиндре (а), с рабочим поршнем и вытеснителем в разных цилиндрах (б), с двумя рабочими поршнями (в):

1 — рабочий поршень; 2 — вытеснитель; 3 — полость расширения; 4 — полость сжатия; 5 — регенератор; 6 — нагреватель; 7 — холодильник

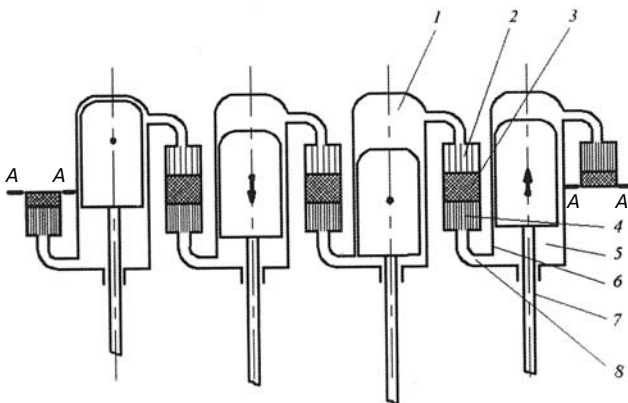


Рис. 4. Схема работы двигателя Стирлинга двойного действия:

1 — полость расширения; 2 — нагреватель; 3 — регенератор; 4 — холодильник; 5 — полость сжатия; 6 — рабочий цилиндр; 7 — шток; 8 — газовый тракт

собраны многоцилиндровые двигатели с переменной мощностью на общий вал.

Двигатели двойного действия — это многоцилиндровые двигатели, в которых полости расширения каждого цилиндра последовательно соединены через ряд теплообменников с полостью сжатия соседнего цилиндра. В цилиндре предусмотрен один поступательно движущийся элемент — поршень-вытеснитель. Число таких элементов в двигателе равно числу цилиндров. Большим преимуществом двигателей двойного действия по сравнению с двигателями одностороннего действия является сокращение в 2 раза числа поршней. Это упрощает кинематическую схему приводного механизма и снижает стоимость двигателя (рис. 4).

Все существующие конструкции двигателей Стирлинга можно свести к α -, β - и γ -модификациям (рис. 5). Такая классификация двигателей внешнего сгорания достаточно точно позволяет определить типы двигателей без необходимости тщательного изучения деталей конструкции.

Двигатели α -модификации — это V-образные двухцилиндровые двигатели. В одном из цилиндров находится горячая полость, а в другом — холодная. Регенератор располагается между цилиндрами.

Двигатели β -модификации имеют только один цилиндр. Объем горячей полости изменяется с помощью поршня-вытеснителя. Изменение объема холодной полости происходит посредством движения как поршня-вытеснителя, так и рабочего поршня.

Достаточно сложная кинематика движения рабочего поршня и вытеснителя осуществляется при помощи различных кривошипно-шатунных

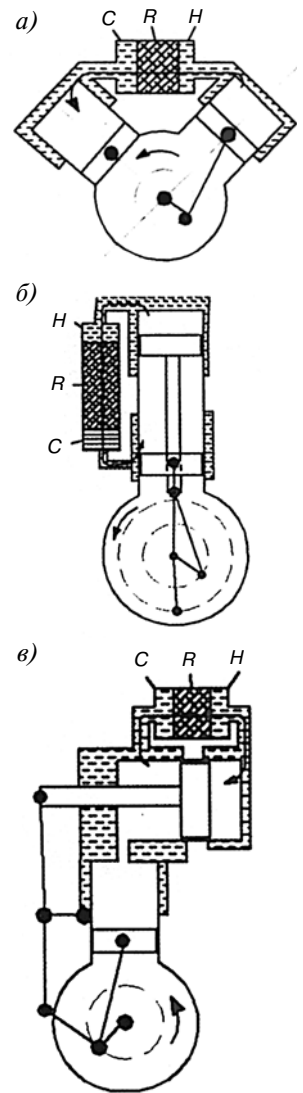


Рис. 5. Модификации двигателей Стирлинга:

а — α -модификация; б — β -модификация; в — β -модификация; H — нагреватель; R — регенератор; C — холодильник

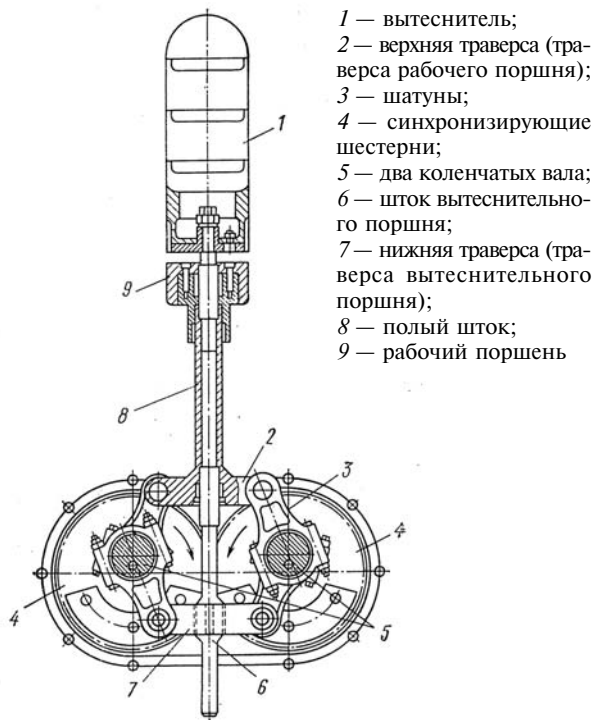


Рис. 6. Шатунно-поршневая группа двигателя Стирлинга вытеснительного типа с ромбическим кривошипно-шатунным механизмом

механизмов. На рис. 6 в качестве примера приведена шатунно-поршневая группа двигателя Стирлинга β -модификации с наиболее распространенным ромбическим двухвальным кривошипно-шатунным механизмом. В двигателе γ -модификации аналогично двигателю β -модификации имеется рабочий поршень и поршень-вытеснитель. Однако они находятся в отдельных цилиндрах. Холодная полость разделена на два цилиндра, и, следовательно, ее минимальный объем всегда больше нуля.

Двигатель Стирлинга может работать не только на жидком, но и на любом другом виде топлива — твердом и газообразном. Он может работать и совсем без топлива! Ведь нагреть часть рабочего объема через стенку цилиндра можно теплотой от ядерного реактора, радиоизотопного источника, от солнечных лучей и т. д. Если же нагреватель двигателя поместить в емкость с расплавленным теплоаккумулирующим материалом, обладающим большой теплотой плавления, то двигатель без всякой дозаправки может работать несколько часов. Подсчитано, например, что 5 л расплава окиси алюминия эквивалентны 1 л бензина, а 8 л расплавленного фторида лития хватает для работы двигателя Стирлинга мощностью 3 кВт (электрической) в течение пяти часов.

Естественно, современные конструкции двигателей Стирлинга в десятки, если не в сотни, раз меньше, чем двигатели внешнего сгорания,

построенные в XIX веке. Применение водорода или гелия в качестве рабочего тела позволило современным машинам настолько снизить габариты и интенсифицировать теплообмен в нагревателе, что двигатели стали на редкость компактными. Замкнув цикл, современные инженеры вынуждены были позаботиться о том, чтобы искусственно охлаждать рабочее тело. В двигателях Стирлинга появился охладитель, тогда как у прежних двигателей внешнего сгорания порции воздуха забирались прямо из атмосферы. Наличие нагревателя и охладителя, как бы компактны они ни были, увеличивает вес двигателя по сравнению с двигателями внутреннего сгорания, но зато сообщает им еще одно чрезвычайно важное качество.

Изолированные от внешней среды, они практически не зависят от нее. Стирлинг может работать от какого-либо источника тепла всюду: под водой, под землей, в космосе — то есть там, где двигатели внутреннего сгорания, нуждающиеся в воздухе, работать не могут. И тогда у двигателей с внешним подводом теплоты появляются преимущества перед своими соперниками ДВС даже по весу.

Информация о двигателях внешнего сгорания будет неполной, если не упомянуть о своего рода «антистирлингах» — двигателях, превращенных в холодильные машины.

Еще в 1834 г. было замечено: если вращать двигатель внешнего сгорания с помощью паровой машины и не разводить огонь под рабочим цилиндром, температура воздуха в нем понижается. На первый взгляд, в этом нет ничего удивительного. У любого теплового двигателя есть свой антипод — холодильная машина, работающая по такому же циклу, но в противоположном направлении.

Поразительно вот что: если паровую машину, дизель или бензиновый двигатель вращать принудительно, никакого охлаждения не получится. Нужны специально сконструированные холодильные машины, чтобы реализовать обращенные циклы паровой машины, дизеля или бензинового двигателя. Двигатель же внешнего сгорания совмещает в «едином лице» и тепловую и холодильную машину.

В 1945 г. инженеры фирмы «Филипс» раскрутили электромотором опытную модель двигателя внешнего сгорания мощностью в 1 л. с. и, к своему удивлению, с поразительной легкостью охладили его цилиндр до -190°C (83 К). Однако такие низкие температуры в то время были не нужны. И только после 1950 г., когда техника низких температур начала выходить из научных лабораторий в промышленность, снова вспомнили о двигателях Стирлинга. Но об этом в следующей части статьи.

(Продолжение в следующем номере)