

ДВИГАТЕЛИ С ВНЕШНИМ ПОДВОДОМ ТЕПЛОТЫ

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

История развития поршневых тепловых двигателей незаслуженно мало внимания уделяет двигателям с внешним подводом теплоты (ДВПТ), работающим по регенеративному замкнутому циклу. Теоретический термодинамический КПД рабочего цикла двигателей этого типа приближается к циклу Карно.

Двигатель Стирлинга, изобретенный в начале XIX в., наиболее полно демонстрирует выдающиеся особенности и свойства, к достижению которых стремится современное двигателестроение: многотопливность, высокий эффективный КПД, экологическая безопасность, низкий уровень шума, способность работать без массообмена с атмосферой, под водой, в космосе и многие другие уникальные свойства.

К сожалению, уровень технологического развития промышленности во время изобретения двигателей этого типа не позволял реализовать все уникальные свойства ДВПТ, однако в настоящее время ситуация изменилась и двигатели Стирлинга получают все более широкое распространение в автомобильной экологически безопасной энергетике.

Перед современным двигателестроением стоят основные задачи: улучшение топливной экономичности и надежности двигателей, снижение их веса, создание простых и технологичных конструкций, снижение выбросов вредных веществ, уровня шума и вибрации.

В двигателях внутреннего сгорания термохимическая энергия топлива превращается в полезную механическую работу. В соответствии с классическими положениями термодинамики, в тепловой машине полное превращение теплоты в полезную механическую работу теоретически невозможно. В реальном двигателе вследствие различного рода потерь доля теплоты, превращаемой в полезную работу, еще ниже, чем в идеальной (теоретической) тепловой машине. Следовательно, одной из основных проблем создания силовых двигателей всегда была и остается проблема достижения максимального эффективного КПД.

Тепловые двигатели делятся на два типа: в одних тепло передается рабочему телу (газу, движущему поршень) в процессе горения топлива внутри цилиндра, в других — передача тепла

рабочему телу осуществляется от внешнего источника. Этот тип двигателей получил название «двигатели с внешним подводом теплоты» (ДВПТ).

Наиболее распространенным ДВПТ была паровая машина, в которой тепло к рабочему телу (водяной пар) подводилось при сжигании топлива, скажем угля, дров и т. п. При этом отработавший водяной пар после превращения его тепловой энергии в механическую работу выбрасывался в атмосферу.

Менее известны в настоящее время ДВПТ работающие по регенеративному циклу, например двигатель, изобретенный в Шотландии Робертом Стирлингом и запатентованный им 27 сентября 1816 г. (английский патент № 4081).

В двигателе Стирлинга рабочее тело циркулирует по замкнутому циклу без газообмена с окружающей средой, а тепло для получения полезной работы подводится к рабочему телу и отводится от него в регенераторе.

Двигатели с внешним подводом теплоты, работающие по регенеративному циклу, обладают целым рядом бесспорных преимуществ по сравнению с традиционными двигателями внутреннего сгорания. К ним относится многотопливность, универсальность по отношению к источнику тепла, высокая экономичность, возможность работы в замкнутых пространствах и минимальное вредное воздействие на окружающую среду. Благодаря этим преимуществам двигатели с внешним подводом тепла могут и должны получить дальнейшее развитие и занять подобающее место в автономной стационарной и транспортной энергетике.

«Калорический двигатель Эриксона»

«Калорический двигатель», изобретенный в середине XIX в. шведским инженером Джоном Эриксоном, также относится к регенеративным двигателям с внешним подводом тепла, был достаточно распространенной тепловой машиной в США в конце XIX в. Однако вследствие сложности конструкции, требующей для его изготовления высокотехнологичного оборудования, и низкого КПД этот тип двигателя сегодня незаслуженно забыт.

Универсальный тепловой двигатель — паровая машина — не только удовлетворял до некоторых пор нужды развивающейся фабричной системы, но и сам послужил мощным стимулом для роста энерговооруженности всех отраслей

производства, и в первую очередь в машиностроении.

В те времена, когда паровая машина была, по сути, единственным механическим двигателем и одерживала одну победу за другой, появление «калорического двигателя» вызвало техническую сенсацию.

Шведский инженер Джон Эриксон вписал яркие страницы в историю развития промышленности США после того, как он решил отказаться от паровой машины и заменить ее «калорическим двигателем» собственного изобретения, работавшим на горячем воздухе. Энциклопедический словарь Брокгауза и Ефрона сообщает о нем следующее:

«Эриксон, Джон — шведско-американский инженер и изобретатель (1803—1889). 14-ти лет он принимал участие в нивелировании канала де Гэта, в 17 лет он поступил в отряд охотников, который должен был составить топографию севера Швеции. В 1833 г.

Э. изобрел первую калорическую машину, которая приводится в движение согретым воздухом. Будучи уже в чине лейтенанта, отправился в Англию, чтобы применить там свое изобретение (1836). Хотя он здесь почти никакого успеха не имел, он все же решил посвятить себя механике и вскоре изобрел паровой насос и конденсатор. В 1839 г. он переселился в Соединенные Штаты и с тех пор жил в Нью-Йорке. Здесь в 1843 г. он построил военное судно "Принцетон", первый паровик с двигателем под водой, который вызвал целый переворот в деле устройства военных паровых судов. Во время возникновения американской гражданской войны Э. приобрел известность постройкой военного судна особого устройства (монитор), которое он позже усовершенствовал, превратив в миноносец. К его позднейшим изобретениям принадлежит так называемая "Солярная машина" (*Solarmaschine*), которая собирает на особом зеркале солнечные лучи и служит непосредственным источником тепла. Связанные с этим изобретением научные изыскания он издал в двух трудах: "*Solar investigation*" (Нью-Йорк, 1875) и "*Contributions to the Centennial Exhibition*" (Нью-Йорк, 1877)».

В 1833 г. Фарадей в одной из своих публичных лекций выразил сомнение в работоспособности машин Эриксона. Великий физик брался даже теоретически доказать, почему машина Эриксона не может работать. Но сразу после лекции Эриксон пригласил Фарадея в свою мастерскую и продемонстрировал ему действующую модель «калорического двигателя», развивавшую мощность в 5 л. с. Фарадей имел мужество признаться в

том, что он не в состоянии объяснить, как работает машина Эриксона. Впрочем, у Фарадея были основания сомневаться в работоспособности «калорической машины», так как Эриксон заявлял тогда и едва ли не до конца своей жизни был убежден в том, что он изобрел вечный двигатель.

Осенью 1852 г. любопытствующая публика с большим интересом взидала на судно, стоявшее на одной из верфей Нью-Йорка, и на его владельца Эриксона, который готовился отправиться на нем через океан в Лондон. Большинство специалистов того времени сошлись на том, что судно с «калорическим двигателем» не сдвинется с места. Но напористого шведа, казалось, несколько не смущало мнение «знатоков». Эриксон упорно работал над своим двигателем около 20 лет. Ему не впервые было выслушивать мрачные предсказания специалистов в области паровых машин. Результаты испытаний оказались обескураживающими не только для скептиков, но и для самого Эриксона.

Вопреки негативным пророчествам, судно не только сдвинулось с места, оно пересекло Атлантический океан, прибыв в Лондон. Однако четыре гигантских по размерам двигателя (диаметр цилиндров — 4,2 м, рабочий ход — 1,8 м) вместо 1000 л. с. развили мощность всего 300 л. с. В то же время расход угля (около 1 кг на одну л. с.) был существенно ниже, чем у паровых машин, используемых в то время на морских судах (около 1,4 кг на одну л. с.). Помимо прочего, к концу рейса нагревательные днища рабочих цилиндров прогорели насквозь, и в Англии машины пришлось демонтировать и заменить на паровые.

В «калорическом двигателе» Эриксона (рис. 1) рабочий *A* и компрессорный *B* поршни жестко



Джон Эриксон

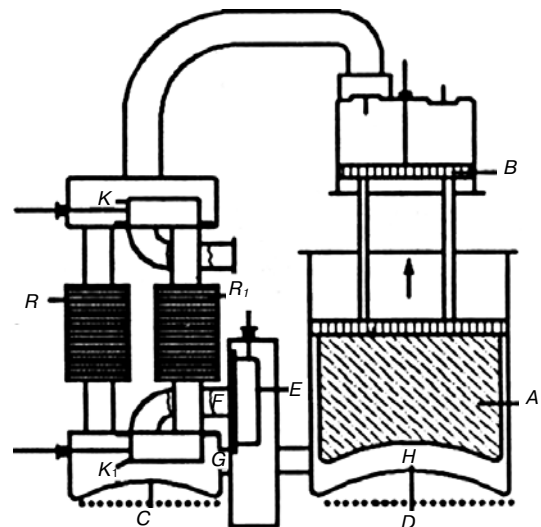


Рис. 1. Тепловой воздушный двигатель Эриксона, 1833 г.

соединены посредством штоков. При движении компрессорного поршня вниз засасывается воздух из атмосферы, а затем, при движении вверх, воздух прокачивается через регенератор *R*. Таким образом, предварительно подогретый воздух проходит вдоль греющей стенки *C* в рабочий цилиндр *H*, где он продолжает нагреваться от стенки *D*. В течение времени, соответствующем примерно $2/3$ хода поршня, клапан *E* перекрывает отверстия *F* и *G*; в это время происходит расширение воздуха в горячем цилиндре *H*. В конце хода клапан *E* быстро сдвигается в крайнее положение так, что воздух выходит в атмосферу через отверстие *F* и регенератор *R*₁. При ходе поршней вниз золотники *K* и *K*₁, могут менять направление потока примерно через 50 циклов таким образом, что регенератор, отдающий теплоту, начнет ее аккумулировать, и наоборот.



Роберт Стирлинг (1790–1878)

В этом двигателе отработавший горячий воздух перед выбросом в атмосферу проходил через регенератор (плотную металлическую проволочную ткань) и отдавал последнему теплоту. А сжатый холодный воздух пропусклся через регенератор и перед тем как попасть в рабочий цилиндр получал эту теплоту обратно.

Поскольку точных измерений тогда никто произвести не мог, создавалось впечатление, что нагревание цилиндра необходимо для пополнения неизбежных потерь теплоты, вызванных лучеиспусканием нагретых частей двигателя, несовершенством работы регенератора, трением и т. п.

Эриксон предполагал, что если строить очень крупные калорические машины, в них удастся снизить вышеназванные потери и получить огромную экономию в топливе.

Однако от мысли строить «калорические машины» большой мощности пришлось отказаться, и Эриксон наладил массовый выпуск небольших двигателей. В те времена еще не было электростанций и двигателей внутреннего сгорания, поэтому неприхотливые и безопасные двигатели Эриксона оказались очень практичными. К 1887 г. в одной только Америке 6000 таких машин отлично работало в типографиях, доках, шахтах и на малых судах. Эти двигатели накачивали воду в водонапорные баки частных домов, приводили в движение лифты, выполняли самую разную работу. Эриксон очень гордился успехом своего любимого изобретения и позже разработал еще одну модификацию — «калорическую машину», действующую от солнечной энергии.

Естественно, у двигателей Эриксона было немало недостатков, в том числе и конструктивных. Так, например, теплота от уходящего воздуха не полностью передавалась в регенераторе. Чрезвычайно высок был расход смазочных материалов, все сочленения в машине создавали весьма громкий шум. Европейские конструкторы и фирмы, от внимания которых не ускользнул успех эриксоновских машин, стали разрабатывать свои собственные конструкции. И уже к 1890 г. на многих промышленных предприятиях Европы и Америки работали двигатели внешнего сгорания. Такие двигатели были установлены и на заводе Нобеля в Санкт-Петербурге. Многие заводы к этому времени выпускали усовершенствованные модели двигателя Эриксона — двигатели Лемана, Ридера и др. Маломощные двигатели в больших количествах изготавливались в то время и в России.

Двигатель «Стирлинга»

В 1790 г. в Шотландии появился на свет Роберт Стирлинг. Даже знаменитая «Британская энциклопедия» о нем умалчивает, хотя некоторые биографические сведения об этом человеке все же дошли до наших дней.

Он был восьмым ребенком в семье, и очень рано проявил большой интерес к технике. Похоже, что этот интерес привил ему его дедушка Майкл Стирлинг, который принимал самое активное участие в изобретении и создании роторной молотилки в 1756 г. Старший брат Роберта Джеймс был великолепным техником и, судя по всему, сыграл главную роль в формировании взглядов младшего брата на изобретательскую деятельность.

Известно также, что жизнь Роберта Стирлинга складывалась вполне благополучно. Родители выбрали для сына карьеру священника — к 25 годам он был уже пастором и получил степень доктора богословия. Прихожане прощали ему небольшие странности, которые заключались в том, что доктор богословия любил уединяться в своей мастерской и изготавливать там различные интересные механизмы.

Богобоязненные коллеги прощали ему все эти причуды, репутация священника оставалась безупречной. Со временем Роберт Стирлинг стал министром по делам Церкви Шотландии.

Однако, судя по всему, религия интересовала его куда меньше, чем техника. Доктор богословия, дожив до 88 лет, так и не удосужился написать ни одного богословского труда.

Стирлинг получил свой первый патент на изобретенный двигатель в 1816 г., за восемь лет

до того, как французский физик и инженер С. Карно опубликовал «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу» — работу, положившую начало учению о тепловых машинах.

Двигатель Стирлинга представляет интерес в нескольких аспектах. Во-первых, в нем осуществляется замкнутый регенеративный цикл. Во-вторых, в качестве источника теплоты можно использовать любое топливо, ориентируясь, скажем, на низкий уровень вредных выбросов. И в-третьих, по крайней мере теоретически, этот двигатель должен обладать большей эффективностью по превращению теплоты в полезную работу.

К 1816 г. Стирлинг сконструировал и построил тепловой двигатель собственного изобретения (рис. 2). Впоследствии ему даже не пришлось биться над усовершенствованием и доработкой своего детища, потому что двигатель сразу хорошо заработал. Это была редкая в технике удача. Правда, спустя несколько лет Роберт Стирлинг вместе с братом Джеймсом все-таки внес в двигатель некоторые изменения. Но они не пошли на пользу, а только сильно усложнили конструкцию. Как показало время, первая модель оказалась самой удачной. Роберт Стирлинг получил три патента на свои изобретения — в 1816, 1827 и 1870 гг.

Длинный вертикальный цилиндр *A* нагревается сверху дымовыми газами от топки *B*; нижняя часть цилиндра охлаждается либо водой, либо конвективным потоком атмосферного воздуха. Внутри цилиндра расположены вытеснитель *C* (меньшего диаметра, чем диаметр цилиндра *A*, который центрируется с помощью небольших роликов) и поршень *D*. При возвратно-поступательном движении вытеснителя воздух, находящийся в цилиндре *A*, попеременно перемеща-

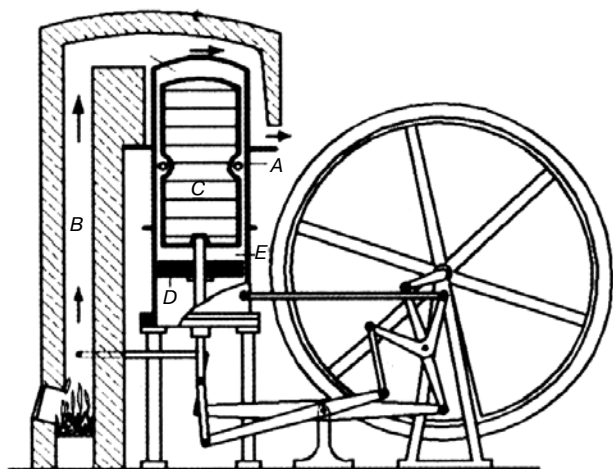


Рис. 2. Первый двигатель Стирлинга (Патент 1816 г.)

ется из холодной плоскости *E* (эта полость находится между нижней частью вытеснителя и верхней частью поршня) через регенератор в горячую полость *F*, расположенную над вытеснителем или наоборот. Регенератор, который здесь не показан, располагается в кольцевом пространстве между вытеснителем и цилиндром (возможно, он состоял из тонкой проволоки, намотанной вокруг вытеснителя *C*). Таким образом, воздух, попеременно находясь то в холодной, то в горячей полостях, изменяет свою температуру и давление, что является причиной совершения им работы над поршнем *D*. В более поздних моделях двигателей Стирлинга в качестве рабочего тела использовались водород или гелий.

Тепловой двигатель Стирлинга появился на 60 лет позже парового двигателя Джеймса Уатта и внешне был на него похож. Этот двигатель относится к двигателям «внешнего сгорания», в которых сгорание топлива, необходимого для работы, происходит не внутри, а вне рабочего цилиндра. При этом двигатель Стирлинга, обладает рядом преимуществ перед паровым двигателем. По сравнению с паровыми машинами он в полтора раза экономичнее, намного долговечнее. Но самое главное и самое неоспоримое его преимущество заключается в том, что, в отличие от паровых машин, он в принципе не может взорваться.

Первые промышленные образцы тепловых двигателей Стирлинга появились во второй половине XIX в., еще при жизни самого изобретателя. Лучшая из машин мощностью в 45 л. с. три года проработала на шахте в г. Данди, Шотландия. В конце XIX в. Британская Империя стала использовать двигатели Стирлинга огромных размеров в своей колонии Индии. С их помощью проводилось орошение плантаций. Эти двигатели выглядели как настоящие монстры: они имели весьма внушительные размеры и, кроме того, были установлены на высоких каменных фундаментах. Несмотря на значительный вес (1,5 т) и габариты (длина цилиндра достигала двух метров), их мощность была сравнительно небольшой и составляла всего около 1,5 кВт. Но впечатляет другое: некоторые из этих двигателей прослужили почти 100 лет и «дожили» до 50-х годов XX в., побив все рекорды долговечности.

Не следует забывать, что первый двигатель Стирлинга работал на атмосферном воздухе и не был герметичным, поэтому обладал сравнительно низкой удельной мощностью. Но вызывает удивление то, что режим работы двигателя максимально соответствует циклу Карно — циклу идеального теплового двигателя.

(Продолжение в следующем номере)