

УДК 621.41:620.91.004.18:502.1

МАШИНЫ СТИРЛИНГА – ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

В. П. Черепанов

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, 39600, г. Кременчуг, Украина. E-mail: nich@kdu.edu.ua

Обсуждается возможность и доказывается необходимость разработки и производства двигателей Стирлинга для использования их в качестве стационарных установок, что даст возможность получить существенную экономию дорогостоящих энергоресурсов и улучшить экологическое состояние промышленных предприятий.

Ключевые слова: двигатель Стирлинга, стационарный, энергосбережение, экология.

STIRLING MACHINES - ENERGY AND ENVIRONMENTAL ISSUES

V. P. Cherepanov

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
vul. Pershotravneva, 20, 39600, Kremenchuk, Ukraine. E-mail: nich@kdu.edu.ua

The possibility and the necessity of the development in the Stirling engines production for their use as stationary units that will give the possibility to yield significant savings in expensive energy sources and improve the ecological status of industries are discussed and proved.

Key words: Stirling's engine, stationary, energy saving, ecology.

МАШИНИ СТИРЛИНГА – ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ І ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ

В. П. Черепанов

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, 39600, м. Кременчук, Україна. E-mail: nich@kdu.edu.ua

Обговорюється можливість і доводиться необхідність розробки і виробництва двигунів Стірлінга для використання їх в стаціонарних установках, що дасть можливість одержати істотну економію дорогих енергоресурсів і поліпшити екологічний стан промислових підприємств.

Ключові слова: двигун Стірлінга, стаціонарний, енергозбереження, екологія.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Проблемы экономии энергоресурсов и охраны окружающей среды являются чрезвычайно актуальными. Значительный вклад в дело решения этих проблем может внести применение в качестве тепловых двигателей тепловой машины Стирлинга [1, 2].

Имя Роберта Стирлинга (1790-1878) – шотландского доктора богословия – занимает почетное место среди тех, кто заложил основы современной термодинамики и теплотехники [3]. В 1816 году Стирлинг получил патент (№ 4081) на «машину, которая производит движущую силу посредством нагретого воздуха». Цикл воздушной машины – двигателя был предложен Стирлингом за 8 лет до выхода в свет работы С. Карно «Размышления о движущей силе и о машинах, способных развивать эту силу». В 1845 году машина Стирлинга мощностью в 50 индикаторных лошадиных сил была пущена на сталелитейном заводе в г. Данди (Англия) и проработала три года.

Машины Стирлинга, будем для краткости называть их «стирлингами», привлекают все большее внимание как специалистов по тепловым двигателям, так и многочисленных представителей самых различных отраслей техники: автомобилистов, строителей подводных лодок и космических кораблей и т. д. Над «стирлингами» работают крупнейшие фирмы США, Японии, Швеции, Голландии, ФРГ и др. стран. Работы проводились и в СССР.

Чем объяснить резкое повышение интереса к «стирлингам» в наше время?

Даже беглое описание конструкции «стирлинга», предназначенного для автомобиля (что не является целью данной статьи) свидетельствует о том, что он

не проще поршневых ДВС. Это подтверждается выкладками исследователей [1, 3–5].

Масса и объем двигательной установки, приходящегося на единицу мощности, больше, чем у бензинового мотора, и близки к показателям дизеля.

Сложнее механизм преобразования поступательно-го движения поршня во вращательное движение кривошипа. Условия протекания рабочего цикла требуют радиатор в два–три раза большего объема, чем у ДВС.

Для получения высоких показателей в качестве рабочего тела для «стирлинга» желательны водород или гелий, обладающие низкой вязкостью и высоким значением удельной газовой постоянной, характеризующей работоспособность газа. Перечисленные недостатки существенны, но устранимы даже в транспортных двигателях [3]. Достоинств немало, и все они существенны [3–5].

Токсичность отработавших газов в пять–десять раз меньше, чем у таких же по мощности ДВС, т. к. топливо сгорает в отдельной камере вне рабочего цилиндра при большом значении коэффициента избытка воздуха (1,3...1,6).

Уровень шума ниже на 20–40 дБ.

Экономичность выше, чем у бензинового ДВС (эффективный КПД достигает 0,36...0,38, а на малых скоростях 25–55 км/ч – выше, чем у «дизеля»).

Добавим индифферентность к виду и качеству топлива. Иными словами, «стирлинг» может работать на самом разном горючем: от бензина до растительных масел, от газа до древесных чурок и т. п. В отличие от ДВС ухудшение качества топлива не ведет к существенному падению КПД и мощности. «Стирлинг» имеет высокую уравновешенность и плавность работы, благоприятную характеристику крутящего

момента, хорошу приємність. Слідуети отметить, что достоинства и недостатки «стирлинга» даны с позиций инженеров-автомобилистов, занимающихся их разработкой с целью использования на автотранспорте. Жесткие требования к автотранспортному двигателю по массе, габаритам, компоновке порождают, в основном, указанные выше недостатки и создают «стирлингу» негативную рекламу.

Целью работы является обосновать целесообразность применения «стирлингов» в различных технологических процессах и производствах в качестве стационарных машин для повышения экономичности и снижения уровня экологической опасности технологических процессов промышленных предприятий.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Рассмотрим вкратце термодинамические основы работы «стирлинга», действующий макет которого выполнен по простейшей кинематической схеме, представленной на рис. 1, которая, в принципе, может быть использована в стационарном «стирлинге».

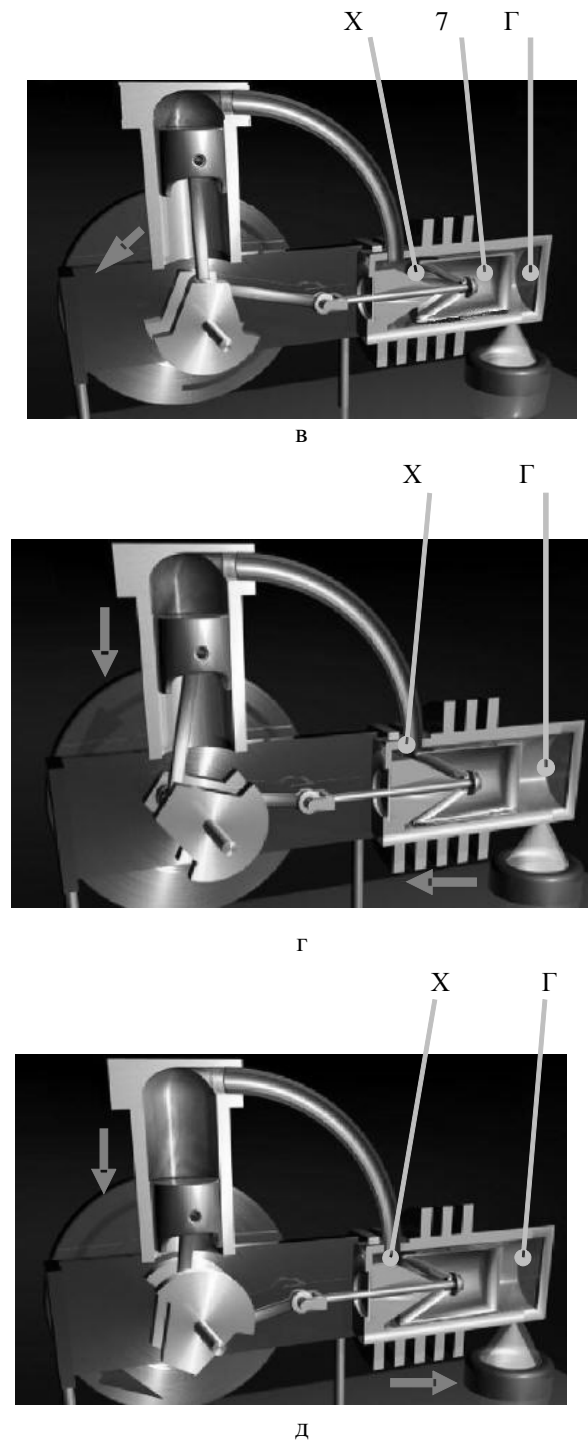
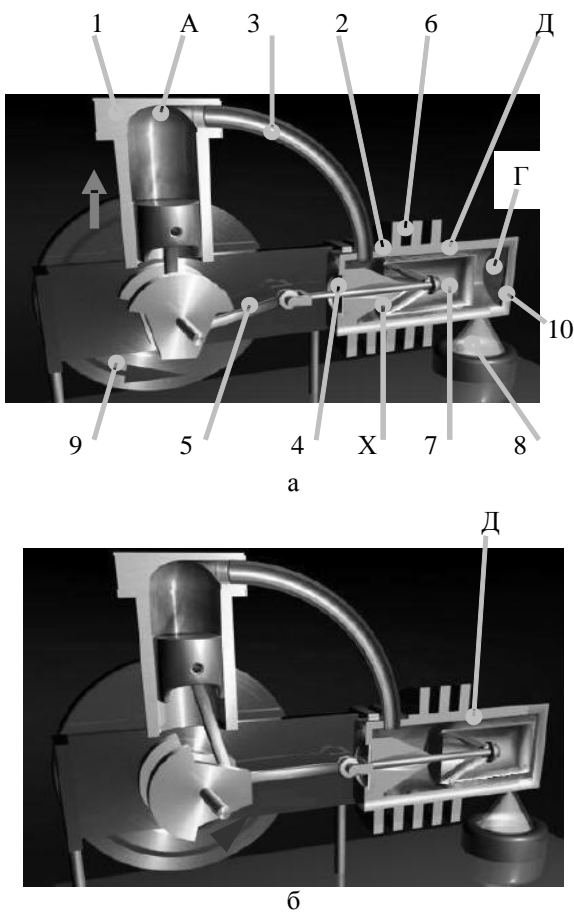


Рисунок 1 – Основные узлы и кинематическая схема машины Стирлинга

Назовем основные узлы двигателя и их назначение (рис. 1):

1 – рабочий цилиндр с рабочим поршнем и кривошипно-шатунным механизмом (КШМ). Этот узел не имеет принципиальных отличий от ДВС. Его работа обеспечивает накапливание энергии на маховике 9.

2 – цилиндр вытеснителя, в котором движется поршень-вытеснитель 7, соединенный, с помощью ползуна 4 и шатуна 5 с кривошипом рабочего поршня. Вытеснитель 7 жестко соединен с ползуном 4, чем обеспечивается гарантированный кольцевой за-

зор «Д» между цилиндром 2 и вытеснителем 7, который служит для перекачивания рабочего тела (далее – РТ) из горячей полости «Г» в холодную полость «X» при сжатии и в обратном направлении – при расширении РТ в цилиндре 1.

3 – трубка, соединяющая полость «А» над рабочим поршнем с полостями «X» и «Г».

6 – радиатор для отвода тепла от РТ в полости «X».

8-источник тепла (камера сгорания, в дальнейшем – КС, в макете – спиртовка).

9 – маховик для накапливания энергии и обеспечения плавности хода двигателя.

10 – теплообменник (в макете – доньшко цилиндра 2) для передачи тепла от источника 8 к РТ в полости «Г».

Как видим, принципиальное отличие машины Стирлинга от ДВС состоит в том, что процесс сжигания топлива в «стирлинге» происходит вне рабочего цилиндра, поэтому рабочим телом в нем является воздух, а не продукты сгорания, как – в ДВС. Поэтому, другое название «стирлинга» – двигатель внешнего сгорания.

В любом тепловом двигателе для получения полезной работы охлаждаемое РТ сжимается, затем к нему подводится тепло и обеспечивается возможность расширения. Разница между работой, получаемой при расширении, и работой, затрачиваемой на сжатие, есть полезная работа цикла.

Рассмотрим, как эти процессы обеспечиваются в «стирлинге», выполненном по рассматриваемой кинематической схеме.

Пользуясь языком теории ДВС, можно сказать, что «стирлинг» является двигателем двухтактным, состоящим из такта сжатия и такта расширения.

Сжатие (рис. 2, кривая 1–2) осуществляется за счет энергии маховика 9.

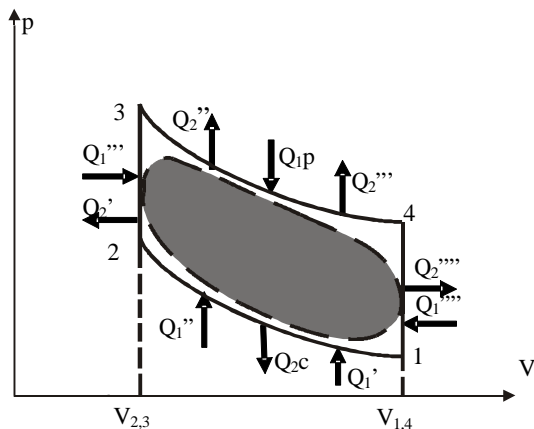


Рисунок 2 – Принцип работы машины Стирлинга

На рис. 1,а показано начало сжатия (рабочий поршень начал двигаться к верхней мертвой точке – ВМТ).

Вытеснитель 7 уже сдвинулся вправо от своей нижней мертвой точки (НМТ), переместив по зазору «Д» значительную часть РТ из горячей полости «Г» в холодную «Х». В полости «Х» РТ охлаждается. Тепло Q_{2c} (рис. 2) отводится в окружающую среду радиатором 6. В процессе сжатия, продолжение которого показано на рис. 1,б,в, большая часть РТ находится в холодной полости «Х». Считать процесс сжатия, протекающим изотермически, даже теоретически невозможно, т.к. часть РТ находится в полости нагрева «Г». И в первой половине сжатия к нему подводится тепло Q_1' .

В конце сжатия (рис. 1,в) рабочий поршень приближается к ВМТ, значительная часть воздуха вытеснителем 7 перемещается из холодной полости «Х» в горячую – «Г». При этом к РТ подводится тепло Q_1'' .

Итак, при сжатии РТ процессы охлаждения и нагревания накладываются: теплота Q_{2c} отводится радиатором в окружающую среду, а теплота $(Q_1' + Q_1'')$ подводится к части РТ, остающейся в горячей зоне

«Г». Эта теплота увеличивает работу, требующуюся для сжатия РТ. При этом сжатие протекает политропически.

Работу сжатия, которая эквивалентна площади $12V_2V_11$ (рис. 2), совершает рабочий поршень, потребляя часть энергии маховика 9.

Скорость движения рабочего поршня возле ВМТ (в конце сжатия и начале расширения) мала, объем РТ изменяется незначительно, поэтому процесс подвода тепла Q_1' в полости «Г» и отвода – Q_2' в полости «Х» (рис. 2, линия 2-3) можно считать изохорическим.

При движении рабочего поршня от ВМТ к НМТ происходит *расширение* РТ (рис. 2, линия 3–4), совершается рабочий ход. Вытеснитель перемещает РТ из холодной зоны «Х» в горячую – «Г» (рис. 1г), где тепло Q_{1P} подводится к РТ (рис. 2).

Давление в зоне «Г» повышается и через кольцевой зазор «Д» и трубку 3 передается в полость А рабочего цилиндра. Рабочий поршень совершает работу расширения, эквивалентную площади $34V_1V_23$ (рис. 2), которая с помощью КШМ преобразуется в кинетическую энергию маховика.

Расширение также является политропическим, т.к. часть РТ все время находится в зоне «Х» и охлаждается. От РТ при этом радиатором отводится тепло Q_2'' и Q_2' .

В процессе 4-1 (рис. 2) рабочий поршень движется возле НМТ и процесс отвода тепла Q_2'' и подвода – Q_1'' можно также считать изохорическим.

Полезная работа теоретического цикла (рис. 3) эквивалентна площади «12341» и представляет собой разницу между работой, совершаемой поршнем при расширении (пл. $34V_1V_23$), и работой, затрачиваемой на сжатие РТ (площадь $12V_2V_11$).

Следует отметить, что работу совершает только рабочий поршень. Вытеснитель работу не совершает, т.к. давление РТ в полостях «Х» и «Г» практически одинаково.

Итак, анализируя работу «стирлинга», выполненного по приведенной выше кинематической схеме, мы получили его термодинамический цикл (рис. 2), состоящий из двух политропических и двух изохорических процессов, при выполнении которых имеет место наложение подвода и отвода тепла к РТ.

Согласно II закону термодинамики термический КПД цикла в данном случае определяется формулой:

$$h_t = 1 - \frac{Q_2}{Q_1},$$

где Q_1 - тепло, подводимое к РТ в процессах 2–3, 3–4, представляющее собой разность тепла, идущего на нагревание РТ от теплообменника в зоне «Г», тепла, отведенного радиатором из полости «Х»;

Q_2 – тепло, отведенное от РТ в процессах 4–1 и 1–2, представляющее собой разность тепла, отведенного радиатором от РТ в полости «Х», и тепла, подведенного к РТ от теплообменника в полости «Г».

Полезная работа реального цикла (рис. 2, пунктирная линия) существенно меньше теоретического из-за невозможности обеспечения на практике теоретических процессов и определяется экспериментально путем снятия индикаторной диаграммы.

Рассмотрев принцип действия «стирлинга» на примере работы простейшей стационарной конструкции, можно констатировать следующее.

При использовании машин Стирлинга в стационарных условиях жесткие требования к показателям «стирлингов» по массе, габаритам, необходимости наличия громоздких радиаторов и тому подобные недостатки автоматически отпадают.

Нет необходимости использования в качестве рабочего тела водорода или гелия. В качестве рабочего тела в стационарном двигателе еще Стирлинг успешно использовал воздух. Это значит, что для создания стационарных машин Стирлинга требуются значительно меньшие средства, чем для транспортных.

Достоинства стационарных «стирлингов» по сравнению с ДВС проявляются в еще большей мере, поскольку «стирлинг» – это машина внешнего сгорания. Сжигание топлива в ней происходит вне цилиндра в специальной КС. В стационарном «стирлинге» КС (по сравнению с ДВС) выполняется значительных размеров. Это позволяет сжигать в ней самые низкоккачественные сорта топлива, обеспечивая хорошее смесеобразование и необходимое время пребывания топлива в зоне горения, что обеспечивает высокий КПД сгорания и низкую токсичность отработавших газов по сравнению с автотранспортными ДВС.

Поскольку горение в «стирлингах» происходит вне цилиндра машины, то представляется блестящая возможность их использования для сжигания отходов нефтеперерабатывающих, металлургических и др. производств и получения дополнительной энергии.

Переработка (сжигание) отходов может стать существенным дешевым источником энергии, в частности электрической, если «стирлинг» использовать для привода электрогенератора. Так, например, перспективным в нефтеперерабатывающем производстве является сжигание в «стирлингах» нефтяного шлама, газовых отходов, «украшающих» заводы в виде «лисыих хвостов» и т.д.

Вообще в «стирлингах» можно эффективно сжигать все, что только может гореть, получая энергию с минимальным ущербом для окружающей среды.

Кроме того, стационарные «стирлинги» конструктивно проще ДВС из-за отсутствия сложных систем (газораспределения, зажигания, впуска и выпуска рабочего тела и т.д.), не прихотливы они и в обслуживании. Даже при низкосортных смазочных материалах обеспечивается их высокий моторесурс, т.к. рабочий поршень находится в холодной зоне, а в системе «вытеснителя» смазывается только опора ползуна, которая также находится в холодной полости. «Стирлинг» практически бесшумен, в производственных помещениях обеспечиваются комфортные условия.

Однако, следует выделить несколько причин забвения машин «Стирлинга».

Во-первых, «стирлинг» уже изрядно забыт. Разговоры о нем во многих учебных заведениях, конструкторских отделах, производственных и эксплуатационных предприятиях позволяют автору статьи сделать вывод о том, что в лучшем случае двигатель Стирлинга считают анахронизмом или вообще о нем не знают даже специалисты по ДВС.

Вторая причина кроется в инерционности научных, проектных, производственных организаций и бизнеса. Огромная «армия» учёных, конструкторов, инженеров, бизнесменов работает над совершенствованием, производством и сбытом транспортных ДВС. Изменить направление движения такой «армии», в которой задействованы огромные средства, очень сложно. Вспомним, с каким трудом пробивался реактивный двигатель в гражданскую авиацию. Только потребности военной авиации в скоростных самолетах позволили в дальнейшем создать и реактивную гражданскую авиацию.

В-третьих. При разработке «стирлинга» всегда имеют ввиду создание транспортного двигателя, для чего требуются существенные затраты. А конкурент силен! (См. 2-ую причину).

Как же быть? Необходимо «стирлинг» рассматривать не как конкурирующий с ДВС двигатель, а как «коллегу» по работе, применяя который в стационарных условиях, государство может получить значительную экономию энергетических ресурсов и улучшить экологические показатели современных производств.

ВЫВОДЫ. Таким образом, существует реальная возможность применения двигателя «Стирлинга» для стационарного использования в производственных целях, что приведет к экономии энергоресурсов (за счет использования дешевых горючесмазочных материалов, высокого КПД сжигания топлива) и снизит экологическую опасность техпроцессов промышленных предприятий (из-за снижения токсичности выхлопных газов, уровня шума и т.д.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Двигатели армейских машин / Под ред. П.М. Белова, - М.: Воениздат, Министерство обороны СССР, 1971.
2. Двигатели Стирлинга / Под ред. М.Г. Круглова. – М.: Машиностроение, 1971.
3. Двигатели Стирлинга / Сборник статей под ред. В.М. Бродянского. – М.: Мир, 1975. – С. 1–15, 31–35.
4. Машины, работающие по циклу Стирлинга / Г.Уоркер. – М.: Энергия, 1978.
5. Автомобильная промышленность. – 1983. – №1. – С. 6–8.

REFERENCES

1. Engines of army vehicles / Edited by P.M. Belov. – M.: Voenizdat, Ministry of Defence of the USSR, 1971. [in Russian].
2. Stirling Engines / Edited by M.G. Kruglov. M.: Engineering, 1971. [in Russian].
3. Stirling engines / Collected papers, ed. V.M. Brodyanskiy. – M.: Mir, 1975. – P. 1–15, 31–35 [in Russian].
4. Machines operating on Stirling cycle / G. Worker. – M.: Energy, 1978 [in Russian].
5. Automotive industry. – 1983. – №1. – P. 6–8 [in Russian].

Стаття надійшла 11.10.2010.

Рекомендована до друку
к.т.н., доц. Бахаревим В.С.