

ДВИГАТЕЛЬ СТИРЛИНГА ВЧЕРА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА

В. С. Кукис¹, В. А. Романов², Ю. А. Постол³

¹Челябинское высшее военное автомобильное

командно-инженерное училище (военный институт), г. Челябинск;

²ФГУП «15 центральный автомобильный ремонтный завод» МО РФ, г. Новосибирск;

³Государственная Таврическая агротехническая академия, г. Мелитополь, Украина

21 сентября 1816 года в Эдинбурге, столице Шотландии Роберт Стирлинг запатентовал машину (рисунок 1), которую он назвал «экономайзер» (economiser).

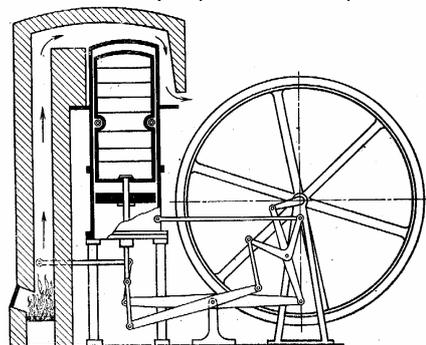


Рисунок 1 – Схема первого двигателя, запатентованного Р. Стирлингом в 1816 г. и построенного в 1818 г.

Двигатель Стирлинга (ДС) – это тепловой поршневой двигатель, работающий по замкнутому циклу с внешним подводом теплоты, и также с внешним её отводом от газообразного рабочего тела.

Среди достоинств машины – высокая экологичность, нетребовательность к виду топлива (способен работать от любого источника теплоты), достаточно высокий КПД (потенциально до 70 %), который явно выше, чем у существовавших тогда паровых машин, и даже современных поршневых ДВС.

Еще в 1908 г. была предложена солнечная установка для привода водяного насоса с помощью ДС. Популярность водяных насосов подтверждалась наличием в фирменных каталогах рекомендаций, подписанных такими известными личностями, как король Эдуард VII. Но, несмотря на этот успех, к 20-м гг. нашего века интерес к двигателям Стирлинга угас.

Всё перечеркивал их главный недостаток, – двигатели были слишком тяжелыми и громоздкими. Это привело к постепенному вытеснению двигателя Стирлинга (ДС) поршневыми ДВС.

Довольно долго ДС использовались лишь как игрушки и учебные пособия в школах и университетах при изучении термодинамики. Но, начиная с 1938 г., интерес к ДС начал возрождаться.

Разработка конструкций двигателей Стирлинга с этого времени прошла через определенные этапы.

1937-1938 гг. Фирма «Филипс» проявляет интерес к двигателям с замкнутым циклом, работающим на подогретом воздухе и предназначенным для электрогенераторов малой мощности.

1938-1947 гг. Создано несколько опытных образцов с лучшими характеристиками по сравнению с двигателями 1930-х гг..

1948-1953 гг. Продолжается исследование и разработка ДС простого и двойного действия. Интерес к ним проявляют фирмы «Форд» (США) и «Дженерал моторс». Резкий скачок в разработке двигателя Стирлинга был сделан в 1953 г., когда Мейер изобрел ромбический привод, что позволило использовать более высокие рабочие давления.

1954-1958 гг. Построено и испытано много двигателей с ромбическим приводом, при этом в двигателе 1-365 с водородом в качестве рабочего тела среднее давление цикла достигло 14 МПа. В 1957 г. «Дженерал моторс» вновь проявляет интерес к ДС и работам фирмы «Филипс». И в ноябре 1958 г. между ними заключается соглашение по предоставлению лицензии сроком на 10 лет.

1958-1962 гг. «Филипс» продолжает работу над двигателем 1-98 с ромбическим приводом. Было построено свыше 30 вариантов этого двигателя. В этот период времени были намечены три основных области применения ДС, в которых фирма «Дженерал моторс» намеревалась проводить дальнейшую работу: подвесной мотор для судов, генератор для спутников, работающий на солнечной энергии, и компактный генератор ГПУ (англ. GPU-Ground Power Unit) для работы в полевых условиях для армии США. Другие возможные области применения

включали силовые установки для речных и каботажных морских судов, подводных лодок и железнодорожного транспорта.

Первым двигателем, который испытывался фирмой «Дженерал моторс», был одноцилиндровый двигатель мощностью 23 кВт с плотной посадкой поршня в цилиндре.

1963-1968 гг. Изобретение ромбического привода и уплотнения типа «скатывающийся чулок», а также усовершенствования процесса сгорания, теплообменников и систем регулирования позволили приступить к созданию более мощных двигателей. Продолжалась интенсивная работа с двигателем ГПУ, и его мощность была доведена до 9 кВт. Кроме того, и «Филипс», и «Дженерал моторс» провели исследования и построили двигатели мощностью 200 кВт. Использовались они на морских судах, на автобусах, в военно-морских силах США.

Продолжались работы и над двигателем простого действия, которые интенсивно вела фирма «Дженерал моторс». Они построили и провели испытания двигателя PD67 для спутника. В 1964 г. на автомобиле марки «Калвер» был испытан ДС мощностью 23 кВт, тепловая энергия для которого поступала от теплового аккумулятора энергии на основе окиси алюминия. В этот же период были начаты исследования свободнопоршневых двигателей и двигателей с жидкими поршнями. Были созданы и испытаны с разной степенью успеха опытные образцы таких двигателей. Работы по свободнопоршневым двигателям проводились в различных институтах США.

1968-1978 гг. Это был период интенсивных исследований, однако без крупных достижений. Работа над автомобильным ДС не прекратилась, и ее продолжали фирмы «Форд» и «Филипс» в соответствии с соглашением, подписанным в 1972 г. Шведская фирма «Юнайтед Стирлинг» также совершенствовала свои автомобильные двигатели, предназначенные для тяжелых грузовиков и автобусов. Объединение MAN-MWM не раскрыло предполагаемую область применения своих двигателей, однако, предполагалось, что эти двигатели предназначены для военно-морских судов. К концу рассматриваемого периода были достигнуты значительные успехи в разработке ДС, работающего на жидком природном топливе и предназначенного для использования на легковых и грузовых автомобилях.

Успешные испытания двигателей серии Р фирмы «Юнайтед Стирлинг», в которых использовался U-образный кривошипный привод Рикардо, вызвали интерес многих фирм. Помимо автомобильного транспорта были рассмотрены другие области применения: такие, как электрические генераторы, использующие солнечную энергию, установки для подводных лодок и дистанционно управляемые стационарные электрогенераторы, работающие не на жидком топливе.

Работы над свободнопоршневым двигателем в этот период достигли такого уровня развития, что стало возможным приступить к коммерческому выпуску двигателей. Были предприняты работы по совершенствованию двигателя с целью использования его на Индийском субконтиненте. Изучались также возможности использования «сухой» модификации этого двигателя, работающего на угле.

Период, начиная с 1978 г. Основное направление работ переключилось с двигателя с качающей шайбой на энергосиловую установку Р-40 с U-образным кривошипным приводом. Интенсивность исследований, связанных с ДС, с 1978 г. возросла примерно в 10 раз, однако все усилия были направлены в основном на доводку существующих конструкций, а не на разработку новых. Нельзя, конечно, утверждать, что работа над новыми конструкциями вообще не велась. Но направление работ во всех областях в большей степени ориентировалось на создание промышленных образцов двигателей, поскольку почти все программы ориентированы на определенную область применения ДС.

В настоящее время ДС в экспериментальном порядке используют во всех областях, где требуется преобразование тепловой энергии в механическую.

Это и автомобильные двигатели, и электрогенераторы малой мощности, и двигатели для морских судов, и солнечные энергетические установки и механический привод в аппаратах «искусственное сердце».

Двигатель Стирлинга был признан Национальным Аэрокосмическим Агентством США (NASA) наиболее перспективным для использования в космической аппаратуре.

Во многих странах мира ведутся активные разработки анаэробных энергетических установок с ДС для подводного кораблестроения.

Универсальные энергетические системы представляют собой механические агре-

ДВИГАТЕЛЬ СТИРЛИНГА ВЧЕРА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА

гаты, которые, будучи снабжены топливом, воздухом и водой, могут обеспечить все энергетические потребности, включая кондиционирование воздуха, выработку электроэнергии, получение горячей и холодной воды. Для таких установок, применяемых в служебных помещениях, гостиницах, жилых домах, складах и крупных торговых центрах, обычно требуется первичный двигатель мощностью 37-370 кВт.

Таким образом, можно сказать, что история ДС далеко не закончена. Его развитие входит в новый многообещающий этап.

Принципиальное устройство ДС можно представить в виде структурной схемы, показанной на рисунке 2 [1].

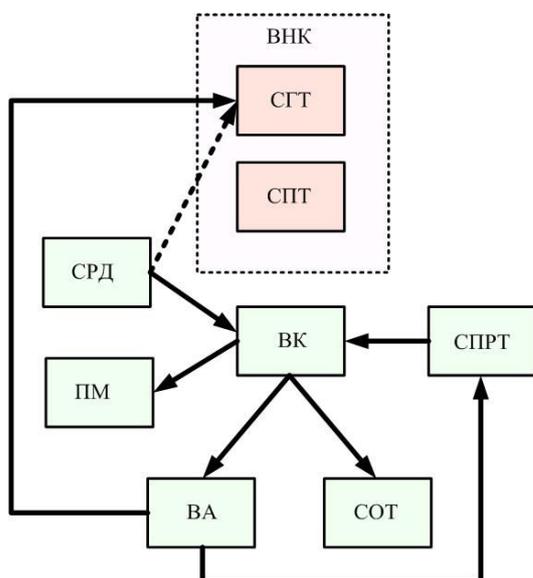


Рисунок 2 – Структурно-функциональная схема двигателя Стирлинга

Она включает в себя: систему генерации теплоты (СРТ); систему подвода теплоты к нагревателю (СПТ); внешний нагревательный контур (ВНК), объединяющий СРТ и СПТ; внутренний контур (ВК); систему отвода теплоты (СОТ); приводной механизм (ПМ); систему пополнения рабочим телом внутреннего контура – СПРТ (большинство моделей стирлингов передают мощность внешнему потребителю через выходящий из картера вал, т. е. не имеют абсолютно герметичного пространства, в котором рабочее тело находится под высоким давлением, между тем, в качестве рабочего тела в ДС наиболее широко применяются гелий и водород – газы с незначительной вязкостью, поэтому двигатель необходимо оборудовать системой пополнения ВК рабочим телом);

систему регулирования двигателя (СРД) и вспомогательные агрегаты – ВА (масляный насос, электрический генератор, система зажигания, компрессор и другие устройства).

Как отмечалось, для трансформации теплоты в работу ДС могут использовать различные источники энергии (солнечную, энергию радиоактивных изотопов, энергию, выделяемую при сжигании металлов и т. п.). Однако специалисты считают, что в обозримом будущем в основном будут использоваться существующие природные топлива (газообразные, жидкие и твердые) и, вероятнее всего, менее очищенные и поэтому более дешевые продукты перегонки сырого топлива. Между тем запасы природного топлива интенсивно истощаются и цены на них в настоящее время очень высоки. Это порождает значительное количество экономических, экологических и социальных проблем. Одним из путей, позволяющих смягчить жесткость указанных проблем, является использование вторичных энергоресурсов, обеспечивающих сбережение природного топлива.

Вторичные энергоресурсы представляют собой «потери» энергии, которыми сопровождается работа любых технических систем, предназначенных для тех или иных ее преобразований (тепловых двигателей, генераторов теплоты и т. п.). В ряду этих систем особое место занимают поршневые двигатели внутреннего сгорания (ПДВС), которые производят более 80 % энергии, потребляемой человечеством. Во многом это обусловлено тем, что именно ПДВС обладают наибольшим КПД среди всех современных тепловых двигателей.

Термодинамические показатели современных ПДВС близки к предельному теоретически возможному уровню, который, к сожалению, обеспечивает превращение в полезную работу не более 45-46 % термодинамической энергии топлива. Остальная теплота, выделившаяся при сгорании топлива, «теряется» либо с поверхности двигателя и его систем, либо с уходящими из него отработавшими газами (ОГ). Значительная часть «потерь» приходится именно на ОГ. В дизелях они составляют 85-110 % по отношению к эффективной мощности, в двигателях с принудительным воспламенением топлива превосходят ее на 25-45 %.

Возвращаясь к ДС, следует отметить их характерную особенность – в этих двигателях имеет место длительное воздействие высокой температуры на некоторые узлы и

детали. Это приводит к необходимости ограничивать верхний предел рабочей температуры нагревателя 600-650 °С (несмотря на применение жаростойких сталей и высоколегированных сплавов на основе кобальта или никеля). Как видно, указанный температурный уровень весьма точно соответствует температуре ОГ поршневых ДВС. Из этого следует, что ДС может эффективно работать на их теплоте.

Весьма важно то, что в случае применения ДС как утилизатора теплоты ОГ поршневых ДВС, рассмотренная выше структурно-функциональная схема двигателя Стирлинга (см. рисунок 2) существенно упрощается, пропадает необходимость в ряде систем и агрегатов.

Прежде всего, из конструкции исключаются системы генерации теплоты и регулирования состава топливовоздушной смеси, представляющие собой сложные (конструктивно и технологически) агрегаты. Они вносят существенный «вклад» в массогабаритные показатели двигателя. Примерно такова же их доля в суммарной стоимости ДС.

Велика негативная роль СГТ и в формировании потерь эксергии источника теплоты. Эти потери обусловлены: необратимостью процессов сгорания, неравновесностью теплообмена между теплоносителями, участвующими в процессах теплообмена, трением теплоносителей о стенки каналов при дросселировании, механическими потерями и смешением компонентов продуктов сгорания в камере сгорания. В результате эксергетический КПД СГТ не превышает 70 %.

При обсуждаемом аспекте использования стирлингов сокращается количество требуемых вспомогательных агрегатов. Например, исчезает потребность в системе зажигания. Таким образом, можно констатировать, что утилизационные ДС отличаются от стирлингов другого назначения простотой конструкции, лучшими массогабаритными показателями и меньшей стоимостью.

Работы по использованию ДС в качестве утилизаторов тепловых потерь ПДВС и теплогенерирующих установок на протяжении последних 10 лет активно ведутся в Челябинском высшем военном автомобильном командно-инженерном училище (военном институте) при активном участии ФГУП «15 центральный автомобильный ремонтный завод» МО РФ (г. Новосибирск) и Таврической государственной агротехнической академии (г. Мелитополь).

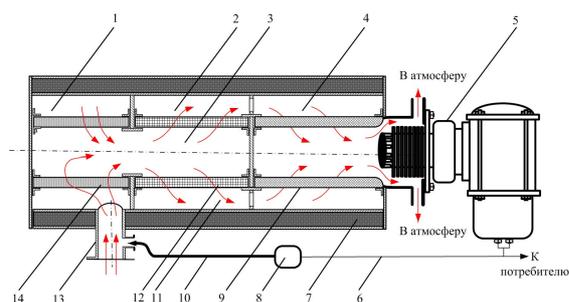
В 1987 г. одним из авторов была реализована силовая установка (СУ), состоящая из дизеля I ЧН 14,5/20,5 в качестве первичного и стирлинга ДС 6,5/3,0 в качестве вторичного контуров использования теплоты [2]. Головка утилизационного ДС располагалась в выпускной системе ОГ дизеля на расстоянии 600 мм от выпускных клапанов. На этой участке коллектор был тщательно теплоизолирован, что позволило сохранить температуру ОГ практически неизменной. Результаты испытаний можно найти в работе [2].

Проведенные исследования показали, что важным фактором эффективного использования термического потенциала ОГ является их температура. Известно, что применение каталитического нейтрализатора (КН) для обезвреживания ОГ приводит к заметному повышению их температуры, а следовательно, и энергетической ценности выбрасываемых в атмосферу продуктов сгорания.

Используя утилизационную систему, помещенную на выходе из КН, можно вырабатывать большее количество механической (электрической) энергии, чем при утилизации теплоты ОГ, выходящих непосредственно из цилиндра двигателя [3]. Эта энергия может быть суммирована с мощностью, вырабатываемой поршневым ДВС, либо использована для привода вспомогательных агрегатов, в том числе для подачи дополнительного атмосферного воздуха в КН. На рисунке 3 показана экспериментальная установка, позволившая оценить работоспособность предложенной системы. Сказанное позволяет повысить мощностные, экономические и экологические показатели СУ. В работе [3] приведены результаты испытаний такой установки.

Эксплуатация транспортной техники в условиях низких температур окружающей среды всегда связана с трудностями надежного пуска двигателя, поддержания его теплового состояния, обогрева кабины (салона) при движении и особенно на стоянке. В большинстве случаев для решения этих проблем используются тепловые генераторы – предпусковые подогреватели и отопители. Обладая рядом преимуществ перед другими средствами предпускового разогрева двигателя и отопления кабины, подогреватели и отопители имеют существенный недостаток – расходуют энергию аккумуляторных батарей в течение всего периода работы.

ДВИГАТЕЛЬ СТИРЛИНГА ВЧЕРА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА



1 – полость перед сажевым фильтром; 2, 11 – наружная полость окислительного блока; 3 – внутренняя полость окислительного блока; 4 – наружная полость восстановительного блока; 5 – утилизирующая стирлинг-генераторная установка; 6 – электрический провод; 7 – теплоизоляция; 8 – нагнетатель воздуха; 9 – восстановительный блок; 10 – воздухопровод; 12 – окислительный блок; 13 – патрубок входа отработавших газов; 14 – сажевый фильтр

Рисунок 3 – Принципиальная схема каталитического нейтрализатора с утилизирующим стирлинг-генератором

Поэтому продолжительность их работы, при неработающем двигателе, ограничивается допустимой степенью разряженности аккумуляторных батарей. С понижением температуры возрастает сопротивление электролита, а также внутреннее сопротивление сепараторов за счет сужения каналов, в которых находится электролит, в результате чего уменьшается напряжение на клеммах аккумуляторной батареи. Одновременно с падением напряжения при низких температурах снижается и емкость батареи. В среднем при понижении температуры электролита на 1 °С емкость аккумуляторной батареи снижается на 1,0-1,5 %.

Вместе с тем, продукты сгорания, выбрасываемые из обсуждаемых генераторов теплоты в окружающую среду, обладают значительным запасом высокопотенциальной энергии. Например, тепловой баланс обогревателя ПЖД-30 выглядит следующим образом:

- полезная теплопроизводительность – 50-65 %,
- потери теплоты с продуктами сгорания – 41-28 %,
- потери через поверхность подогревателя – 6-8 %.

Если принять во внимание, что теплопроизводительность подогревателя ПЖД-30 составляет 30 кВт, то становится понятным, что с выбрасываемыми в атмосферу продук-

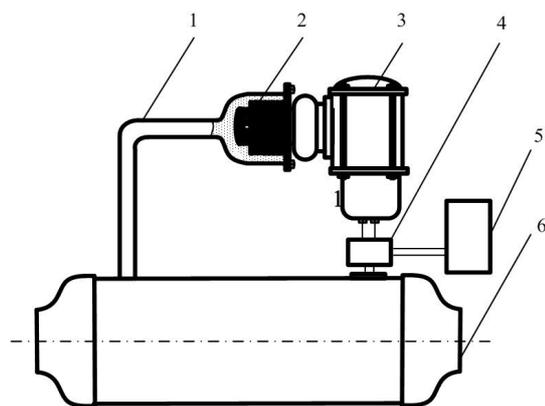
тами сгорания теряется значительное (около 15 кВт) количество энергии.

Одним из возможных направлений утилизации теплоты продуктов сгорания является ее трансформация в электрическую энергию при помощи ДС, совмещенных с электрическим генератором.

Для экспериментальной проверки возможности обеспечения теплового генератора электроэнергией, вырабатываемой за счет утилизации теплоты выбрасываемых в атмосферу продуктов сгорания автором был использован ДС с размерностью 5,5/2,1, совмещенный с электрическим генератором [4], тот же, что был использован для утилизации теплоты газов, уходящих из КН.

В качестве теплового генератора был использован отопитель ОВУ-65Б, широко используемый на объектах современной транспортной техники.

Результаты испытаний созданной автором экспериментальной установки (рисунок 4) [5], включавшей указанный отопитель и утилизирующий стирлинг-генератор, соединенный с камерой сгорания отопителя тепловой трубой, подтвердили возможность обеспечения длительной работы отопителя (длительность работы ограничивается только наличием в нем топлива), без использования внешних источников электрической энергии после выхода установки на нормальный режим работы.



1 – тепловая труба; 2 – нагреватель двигателя Стирлинга; 3 – картер двигателя Стирлинга, совмещенный с электрическим генератором; 5 – внешний потребитель электрической энергии; 6 – отопитель ОВ-65Б

Рисунок 4 – Отопитель ОВ-65Б с утилизирующим стирлинг-генератором

Тепловая производительность отопителя ОВ-65Б при автономном в отношении

внешних источников электрической энергии функционировании в составе изученной технической системы снижается на 4,2 % при работе на полном и на 4,8 % – при работе на частичном режимах (что, однако, не выходит за границы паспортной тепловой производительности отопителя).

При этом в первом случае кроме теплого воздуха предложенная техническая система вырабатывала для внешних потребителей 127 Вт электроэнергии на полном и 173 Вт на частичном режимах работы.

Приведенные примеры эффективного использования ДС в системах утилизации бросовой теплоты ОГ и продуктов сгорания и теплогенерирующих установок демонстрируют новые перспективы широкого применения этих двигателей в современных условиях развития техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стефановский, Б.С. Некоторые особенности нагрева и охлаждения рабочего тела в течение рабочего цикла двигателя с внешним подводом теплоты модификации «гамма» / Б. С. Стефановский, А. Б. Стефановский, Ю. А. Постол, Е. В. Снижко // Труды ТГАТА. Мелитополь, 1998. – Вып. 2. – Отраслевое машиностроение. – Т. 6. – С. 10-13.
2. Кукис, В. С. Энергетические установки с двигателем Стирлинга в качестве утилизатора тепловых потерь : учеб. пособие / В. С. Кукис. – Челябинск : ЧВВАИУ, 1997. – 127 с.
3. Романов, В. А. Каталитический нейтрализатор с повышенной надежностью и эффективностью снижения вредных выбросов / В. А. Романов, В. С. Кукис // Научный вестник ЧВВАКИУ. – Вып. 18. – Челябинск : ЧВВАКИУ, 2006. С. 102-104.
4. Романов, В. А. Первичный двигатель стирлинг-электрического генератора для утилизации теплоты отработавших газов поршневых ДВС / В. А. Романов, В. С. Кукис // Материалы II съезда инженеров Сибири (20-21 марта 2008). – Ч. 2. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2008. – С. 137-143.
5. Романов, В. А. Применение двигателей Стирлинга для обеспечения электрической автономности генераторов теплоты колесных и гусеничных машин / В. А. Романов // Ремонт: Методические рекомендации по ремонту бронетанкового вооружения и техники и автомобильной техники. – СПб. : 29 КТЦ. – №132, 2006. – С. 49-54.