

# Производство двигателя Стирлинга – новая отрасль в машиностроении XXI века

Н. Г. Кириллов, д.т.н., академик Академии военных наук

## IN BRIEF

**The manufacturing of Stirling engines – is new branch in engine-building industry of XXI century.**

*The search of new and promising technologies of power conversion and the production of advanced machines on the base of high-efficient thermodynamic cycles with utilization of renewable energy sources – are the main directions of economic development in XXI century. The creation of high-efficient and pollution-free power systems will ensure power and refrigeration demands with minimal material resources costs. In all developed countries the turn to new technological level is connected, primarily, with energy saving and reduction of traditional energy sources utilization. Thus, by 2025 more than 20 % of power will be generated from alternative fuels in European countries. By estimation of foreign analysts the one of the most perspective ways here is development of power plants on the base of Stirling engines. Low emission and noise levels, fuel flexibility, long life-time, high torque give the opportunity to Stirling engines to occupy competitive position on world power market.*

## Двигатели Стирлинга для развития альтернативной энергетики

Основные направления развития экономики в XXI веке – поиск перспективных технологий энергопреобразования и производство новой техники на основе высокоэффективных термодинамических циклов с использованием возобновляемых энергоресурсов. Переход на новый технологический уровень связан, прежде всего, с энергосбережением и сокращением доли использования традиционных энергоресурсов. Так, к 2025 г. в странах ЕС более 20 % энергии будет производиться за счет использования альтернативных видов топлива.

По мнению многих зарубежных специалистов, перспективным направлением при этом является разработка и широкое внедрение энергетических установок на основе двигателей Стирлинга [1, 2] (фото 1). Низкий уровень шума, малая токсичность отработавших газов, работа на различных видах топлива, большой ресурс, соотношение размеров и массы, хорошие характеристики крутящего момента – все эти параметры дают возможность двигателям Стирлинга в ближайшее время значительно «потеснить» двигатели внутреннего сгорания.

Двигатель Стирлинга, относящийся к классу двигателей с внешним подводом теплоты, является уникальной тепловой машиной. Циклические процессы сжатия и расширения в двигателе происходят при различных значениях температуры, а управление потоком рабочего тела осуществляется путем изменения его объема.

Конструктивно двигатель представляет собой удачное сочетание в одном агрегате компрессора, детандера и теплообменных устройств: нагревателя, регенератора и холодильника, образующих внутренний контур. Он содержит некоторый постоянный объем рабочего газа, перемещающийся между «холодной» частью (находящейся в зоне температуры окружающей среды) и «горячей» частью. Компонентная схема двигателя представлена на рис. 1.

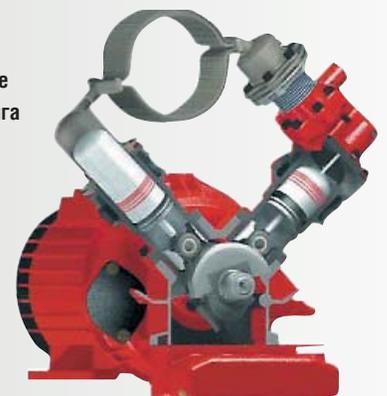
Как у любого двигателя с внешним подводом теплоты, нагревание рабочего тела во внутреннем контуре происходит через теплообменную поверхность за счет сжигания любого вида топлива или других источников теплоты. Это позволяет применять в двигателях Стирлинга как традиционные, так и нетрадиционные виды топлива – биогаз, уголь, отходы лесной промышленности и сельского хозяйства, а также солнечную и другие виды энергии. Многотопливность делает их особенно привлекательными для использования возобновляемых и местных источников энергии.

Уже сегодня наиболее крупные инновационные проекты в области альтернативной энергетики связаны именно с двигателями Стирлинга. Наиболее значимым проектом по использованию солнечной энергии в настоящее время является создание грандиозной «солнечной фермы» на юге США. В штате Невада на площади 160 км<sup>2</sup> создается «ферма», включающая 70 тыс. энергоустановок на основе двигателей Стирлинга. По расчетам американских специа-



С Фото 1.  
Энергоблок на базе двигателя Стирлинга

↻ Рис. 1.  
Компонентная схема двигателя Стирлинга



листов, она может полностью покрыть все потребности южных и юго-западных штатов США в электроэнергии. Общее количество солнечной энергии, достигающее поверхности Земли, в 6,7 раза больше мирового запаса ресурсов органического топлива. Используя только 0,5 % этого запаса можно полностью покрыть мировую потребность в энергии на тысячелетия. Именно поэтому после создания «солнечной фермы» в США такие проекты планируется развернуть в Южной Америке, Северной Африке, Австралии, Индии, на Ближнем Востоке и в других южных странах (рис. 2).

В настоящее время все американские программы по освоению космоса основываются на применении энергоустановок с двигателями Стирлинга, работающих за счет атомной энергии. Такой двигатель может обеспечить надежную работу установки без обслуживания, с ресурсом более 6 лет, при КПД преобразования тепловой энергии в электрическую 35-40 %. В качестве источника тепла для двигателя могут использоваться радиоизотопные тепловые блоки и ядерные реакторы.

Планируется, что атомные энергоустановки с двигателями Стирлинга мощностью от 500 Вт до 15 кВт будут использоваться на «долгоживущих» пилотируемых и беспилотных космических аппаратах. Установки мощностью от 15 до 200 кВт и более целесообразно применять на пилотируемых орбитальных станциях или обитаемых лунных базах с большими потребными мощностями. Так, по проекту SP-100 для планируемой лунной базы в США создается ядерная энергоустановка с тремя двигателями Стирлинга общей мощностью 250 кВт и массой 3 тонны.

В 2011 г. NASA планирует отправить к спутнику Юпитера исследовательский зонд с ядерным реактором на борту. Разрабатывает «атомные Стирлинги» компания Lockheed Martin и Glenn Center. В настоящее время уже создан двигатель мощностью 25 кВт для энергетической установки с радиоизотопной накачкой.

Кроме атомных, разрабатываются также и солнечные энергоустановки с двигателями Стирлинга мощностью от 3 кВт до 100 кВт. Фирмой Alisson создан космический вариант солнечной установки мощностью 5 кВт, частота вращения двигателя – 3000 об/мин, КПД около 35 %. В качестве источника теплоты используется параболический лепестковый концентратор диаметром 5,8 м, создающий в приемнике температуру 947 К. В ловушке приемника излучения предусмотрен тепловой аккумулятор, отдающий тепло фазового превращения при постоянной температуре на теневых участках орбиты полета. Энергоустановка

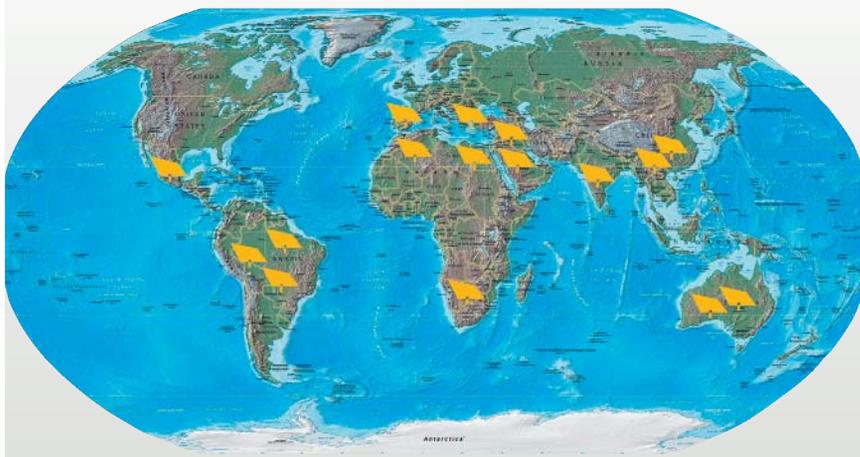


Рис. 2.  
План размещения «солнечных ферм» с двигателями Стирлинга в различных регионах мира

имеет массу 250 кг и уже испытана на одном из искусственных спутников Земли типа «Джемини». К разработке солнечных энергоустановок с двигателями Стирлинга для космических объектов в последнее время подключились такие крупные зарубежные фирмы, как Sanpower, British Aerospace Public Company, MC Donnell Douglas Aerospace, United Stirling AB и др.

При этом нужно отметить, что в тех областях техники, где начинают применять двигатели Стирлинга, происходит технологический рывок. Так, например, применение на шведских неатомных подводных лодках анаэробных энергоустановок с двигателями Стирлинга значительно повысило их «скрытность» и совершило настоящий переворот в области подводного кораблестроения (рис. 3, фото 2).

Сейчас по этому пути идут все ведущие фирмы, производители подлодок [3], поскольку «на кону» – мировой рынок подводных лодок XXI века, а это примерно 400 единиц до 2030 года. «Козырными картами» в этой борьбе, несомненно, станут субмарины с двигателями Стирлинга. Они уже в настоящее время по «скрытности» и другим характеристикам не только приблизились к атомоходам, но по некоторым показателями даже превосходят их. Так, в ходе двух учений в Атлантике, прошедших в 2003 г., шведская подводная лодка Halland с анаэробными двигателями Стирлинга опередила испанскую субмарину с обычной дизель-электрической установкой, а затем и французскую атомную подлодку. Она же в Средиземном море лидировала в «схватке» с американской атомной подлодкой «Хьюстон». Нужно отметить, что малозумная и высокоэффективная Halland в 4,5 раза дешевле своих атомных соперников.

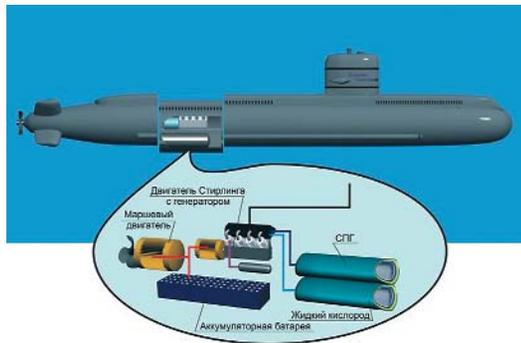
В настоящее время в Германии началась реализация проекта по размещению 80 тыс. когенерационных мини-установок с двигателями Стирлинга для покрытия пиковых нагрузок. В перспективе в каждой квартире жителей западной Европы, США и Японии будет работать такой «домашний» стирлинг-генератор, что позволит сократить до 60 % потерь в системах тепло- и электроснабжения. К созданию таких установок уже приступили крупнейшие корпо-



Фото 2.

**Двигатель Стирлинга мощностью 75 кВт для анаэробных энергоустановок**

Рис. 3. Шведская подлодка с врезкой анаэробной установки с двигателем Стирлинга



рации мира: Bosch Group (Германия), Rinnai (Япония), MTS Group (Италия), MCC (Испания) и др. И это только некоторые примеры использования двигателей Стирлинга в инновационных проектах XXI века.

Ведется разработка двигателей, использующих в качестве топлива древесную щепу, пеллеты, солому, рисовую шелуху и биогаз. Созданы опытные образцы, и готовится их серийное производство. Предполагается, что именно энергетические установки с двигателями Стирлинга, работающие на местном топливе, будут играть решающую роль в энергообеспечении стран «третьего» мира.

Перспективы использования двигателей Стирлинга в различных областях энергетики стали очевидны для всех промышленно развитых стран мира. Сегодня ведут интенсивные работы в этом направлении не менее 140 научно-исследовательских организаций и компаний США, Великобритании, Японии, ФРГ, Швеции и Нидерландов. Начались исследования в Китае, ЮАР, Австралии, Израиле, Канаде, Индии. Объективно в последние 10-15 лет в мире начала формироваться новая, перспективная отрасль машиностроения – стирлингостроение.

### Перспективы развития стирлингостроения в России

Развитие стирлингостроения, как новой отрасли промышленности, даст новый импульс в развитии отечественного двигателестроения [4, 5]. России необходимо заниматься созданием и производством машин Стирлинга, поскольку не надо догонять зарубежные страны в области производства двигателей внутреннего сгорания (дизелей и карбюраторных двигателей), где мы безнадежно отстали. Стирлингостроение – это новая отрасль, в которой у зарубежных развитых стран пока еще нет явного превосходства. Они только в самом начале пути – и у России сейчас есть все шансы быть в числе первых.

Кроме того, у нас пока еще есть научно-технический потенциал, который в данной области превосходит зарубежный. И если это

направление будет поддержано Правительством, то через 5-7 лет Россия может стать одним из лидеров в области производства высокоэффективного и экологически чистого энергетического оборудования. Развитие данного направления позволит:

- обеспечить загрузку машиностроительных предприятий производством конкурентоспособной продукции;
- изменить существующую структуру потребления первичных энергоносителей внутри страны, сократить потребление нефтепродуктов и природного газа за счет более широкого использования местных видов топлива – древесины, торфа, биогаза и т.д.;
- обеспечить электричеством и теплом удаленные регионы – это 70 % территории РФ и более чем 30 млн человек;
- повысить надежность энергоснабжения энергодефицитных районов, которые охвачены централизованным электроснабжением, но ограничены по мощности;
- высвободить в структуре энергобаланса страны объемы традиционных энергоносителей, необходимых для договорных экспортных поставок нефти и природного газа.

Сегодня в России наблюдается явный парадокс: страна не производит машин, работающих по циклу Стирлинга, но при этом имеет более чем 40-летний практический опыт в данной области. Именно этот опыт является фундаментом для возможного технологического рывка в области производства современных высокоэффективных двигателей Стирлинга. В истории отечественного стирлингостроения можно выделить два этапа.

Первый этап относится к советскому периоду – 1959-1992 гг. Он начался, когда в СССР приступили к подготовке производства криогенных машин Стирлинга для зарождавшейся аэрокосмической отрасли. В то время не существовало отечественной научной школы по проектированию машин, работающих по циклу Стирлинга, поэтому все модели были копиями машин зарубежных компаний Phillips и Warkspoor. Холодильное оборудование с криогенными машинами Стирлинга производили предприятия «Арсенал», «Гелиймаш», «Сибкриотехника» и др. Здесь было организовано производство криогенных машин, на основе которых выпускались воздухоразделительные установки ЗИФ-700/-1002/-2002, а также криогенные машины с несмазываемыми поршневыми уплотнениями и ромбическим приводом – КГМ 1500/80 и КГМ 900/80. Однако в 1990-1995 гг. из-за отсутствия в России платежеспособных заказчиков производство криогенного оборудования данного типа было полностью прекращено.

С 1991 по 1994 гг. проводились работы по созданию холодильных установок для авторефрижераторной техники. В результате были созданы опытные образцы холодильных машин мощностью до 5 кВт, работающих в диапазоне температур +12...–43°C, которые по эффективности и массогабаритным характеристикам соответствовали современным ПКХМ для авторефрижераторной техники. Но в связи с общим спадом в экономике и финансовыми трудностями заказчиков, в 1994 г. работы по данному проекту были прекращены.

С 1972 по 1991 гг. в ЦНИДИ и ряде других организаций проводились исследования по созданию отечественных двигателей Стирлинга. За это время предпринимались попытки создания моделей мощностью от 200 Вт до 250 кВт. Так, в 1980-х годах был разработан двигатель, предполагаемая мощность которого составляла 250 кВт. Однако из-за ошибок в расчете внутреннего контура он «выдавал» только 50 кВт полезной мощности.

Таким образом, высокоэффективных, конкурентоспособных на мировом рынке двигателей и холодильных машин Стирлинга, несмотря на проведенные работы, создать не удалось. К сожалению, после распада СССР работы в этом направлении были полностью прекращены, с почти полной утратой научного и кадрового потенциала.

Однако советский этап в развитии стирлингостроения имел свои результаты. Были получены интересные научно-практические данные по конструкциям камер сгорания для двигателей Стирлинга, математическому моделированию процессов во внутреннем контуре двигателя и т.д. Этот опыт послужил основой для дальнейшего развития отечественного стирлингостроения.

Второй, современный этап начинается с научно-исследовательских работ в Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского в 1990 году. С 1990 по 2004 гг. эта организация была единственной в России, где проводились системные экспериментальные работы по всему спектру применения машин Стирлинга в интересах Минобороны РФ. Надо отметить, что в России (как и за рубежом) работы, связанные с созданием машин данного цикла, проводились в основном в рамках оборонных ведомств с целью их применения в военной технике. Однако сегодня именно те технологии, которые созданы в недрах военно-промышленного комплекса, становятся основополагающими в развитии многих отраслей промышленности.

За 15 лет интенсивной работы накоплен значительный научно-технический потенциал, во многом превышающий потенциал ведущих

зарубежных компаний в этой области. Была сформирована новая российская научная школа проектирования и расчета машин Стирлинга.

На базе данного потенциала в С.-Петербурге в период с 2004 по 2008 гг. создается несколько научно-производственных компаний для реализации крупных проектов – Инновационно-исследовательский центр «Стирлинг-технологии», ЗАО «Русский Стирлинг» и ЗАО «Научно-исследовательский и проектный институт стирлингостроения». Здесь проводились опытно-конструкторские работы по созданию гаражных заправочных станций сжиженного природного газа и систем улавливания паров нефтепродуктов на основе криогенных машин Стирлинга, разработана проектно-сметная и конструкторская документация на серийное изготовление данных систем. Также был реализован проект контейнерной электростанции с двигателем Стирлинга, работающим на угольном метане.

Полученные результаты позволяют выйти на мировой рынок с принципиально новой, высокоэффективной и экологичной техникой для нефтегазового комплекса и автономной энергетики. Однако резкое сокращение финансирования проектов, связанное с сегодняшним мировым кризисом, не позволило приступить к серийному производству разработанных систем, и эти компании перестали существовать.

Сегодня в С.-Петербурге создана новая компания по разработке и продвижению проектов на основе машин Стирлинга – Инновационно-консультационный центр стирлингмашиностроения (ИКЦ «Стирлингмаш»). ИКЦ в полном объеме сконцентрировал в себе весь практический опыт и научный потенциал, накопленный отечественными специалистами за последние 40 лет в данной области. Используя этот потенциал, можно наладить производство двигателей Стирлинга практически на любом российском машиностроительном предприятии. **D**

#### *Использованная литература*

1. Кириллов Н.Г. В XXI век – на машине Стирлинга // *Машины и механизмы*. 2007, № 5.
2. Кириллов Н.Г. Газопоршневые двигатели Стирлинга – технологический прорыв в автономной энергетике XXI века // *ГАЗинформ*. 2008, № 2.
3. Кириллов Н.Г. Перспективы развития судовой энергетике на основе машин Стирлинга // *Морской флот*. 2002, № 2.
4. Кириллов Н.Г. Найдут ли двигатели Стирлинга применение в российской экономике? // *Энергетика и промышленность России*. 2005, № 2.
5. Кириллов Н.Г. Производство машин Стирлинга – новое перспективное направление в развитии отечественного машиностроения // *Вестник машиностроения*. 2005, № 8.