

ДВИГАТЕЛИ СТИРЛИНГА: РАЗВИТИЕ КОНСТРУКЦИЙ И МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

*В.С. Дворцов, начальник конструкторского бюро,
М.М. Ткаченко, ведущий инженер-конструктор,
ООО «Тепловые моторы», Москва
М.И. Куколев, профессор кафедры гидравлики
ИСИ СПбПУ, Санкт-Петербург*

Дано описание результатов развития двигателей Стирлинга (ДС) за последние десятилетия и приведены рабочие параметры современных образцов двигателей. Показано, что конструкция силовых механизмов ДС развивается в направлении применения бесшатунных схем С.С. Баландина, А.И. Костина и других запатентованных в РФ решений.

Одним из перспективных направлений развития ДС является применение конструкций модульного типа, что позволяет значительно упростить процесс создания мощного двигателя методами физического моделирования на основе исследований и доводки процессов в одном из однотипных рабочих контуров. Обоснована необходимость подготовки специалистов по ДВПТ на кафедрах технических университетов, отсутствие которых сдерживает организацию производства многотопливных, бесшумных и экологически безопасных двигателей в РФ.

История «взлетов и падений» двигателя с внешним подводом теплоты, работающего по циклу Стирлинга, насчитывает уже 200 лет. В начале прошлого века подобные двигатели выпускали серийно в различных модификациях.

Современный этап развития двигателей Стирлинга (ДС) и холодильно-газовых машин, работающих по обратному регенеративному циклу, фактически начинается в 30–40-х гг. XX века, когда голландской компанией «Phillips Gloeilampenfabrieken» были разработаны серийные криогенные машины и экспериментальные образцы двигателей. Эти работы стали фундаментом современных разработок многих фирм в различных странах мира.

Дать надежный прогноз развития ДС достаточно сложно, так как помимо технических и технологических проблем присутствует и негативный политический аспект. Так, для силовых установок гибридного автомобиля давно предлагается ДС, что позволило бы эксплуатировать подобные транспортные средства, в том числе и в холодном климате с экологически чистыми малошумными многотопливными двигателями. К примеру, при создании современного автомобильного мно-

гоцилиндрового парового двигателя с внешним подводом теплоты (ДВПТ) в Германии [1] были использованы пористые газовые горелки, которые обеспечивали высокую компактность, многотопливность и экстремально малый выброс вредных веществ при практически полном сгорании топлива. Горелки успешно испытаны на природном газе, пропане, бутане, всех широко применяемых автомобильных топливах (в газообразном состоянии) причем любого качества. Однако такое решение открывает рынок для производства различных топлив, которые будут дешевле высокооктанового бензина, а это вряд ли сможет преодолеть «нефтяное лобби» на современном этапе.

Тем не менее, к настоящему времени исследованиями ДС продолжают активно заниматься во всех развитых странах мира. Затрачены огромные средства на НИОКР, исследованы различные области применения двигателей, построены исследовательские стенды, опытные и серийные образцы двигателей. Разработаны методы расчета двигателей на основе современной вычислительной техники и с учетом результатов экспериментальных исследований. Количество научных и тем более научно-популярных публикаций трудно подсчитать. Интернет заполнен информацией о действующих макетах самодельных двигателей и советами, как сделать двигатель у себя в гараже или на даче, в результате чего возникает обманчивое ощущение простоты создания ДС. Известны модели современных двигателей мощностью от 1 до 100 кВт, с эффективным КПД до 35 %, средним эффективным давлением до 2 МПа, массогабаритными показателями и уравновешенностью одного порядка с ДВС, при этом практически бесшумные. Рабочее тело — гелий или водород, ресурс выше, чем у ДВС.

Несмотря на эти преимущества ДС, как и вообще ДВПТ, пока не получили широкого применения. Оставляя за рамками данной статьи обсуждение «причин искусственного сдерживания развития ДВПТ, кратко коснемся вопросов расчета термодинамического цикла, развития силовых механизмов и экспериментальной отработки образцов ДС.

Сегодня расчет процесса ДС по классическому методу Шмидта уже практически не интересен, за исключением ознакомления с ДС в учебном процессе. Метод дает сравнительно простые выражения для расчета индикаторной и эффективной выходной мощности с приемлемой точностью [1]. При этом точно оценить КПД цикла метод не позволяет.

Эффективность идеального термодинамического цикла Стирлинга можно охарактеризовать следующими показателями. В цилиндре объемом 1 литр (1000 см^3) изотермически сжимается идеальный газ от начального давления 2 МПа до 4 МПа (степень сжатия 2) при температуре 300 К. Затем этот газ нагревается до температуры 900 К при постоянном объеме. Давление в конце сжатия составит 12 МПа. Изотермическое расширение со степенью 2 снизит давление до 6 МПа. Энергия от охлаждающегося до 300 К газа поглощается регенератором и затем возвращается рабочему телу в цикле нагрева. Среднее давление сжатия — 3 МПа, среднее давление расширения — 9 МПа. Среднее эффективное давление в цикле — 6 МПа, индикаторный КПД при этом — 66,7 %. При 3000 об/мин литровый двигатель может развивать индикаторную мощность до 300 кВт. Приведенные параметры по давлению и температуре вполне достижимы для современных ДС. Так, реальный ДС фирмы «Phillips» рабочим объемом 1085 см^3 при 3000 об/мин развивал мощность 88,5 кВт. Среднее давление гелия составляло 11,85 МПа; температура охлаждающей воды — 313 К, стенки нагревателя — 978 К, эффективный КПД — 36,5 %. Известны образцы двигателей, работающие при $p_{\text{ср}} = 24 \text{ МПа}$, $p_e = 5,7 \text{ МПа}$ и имеющие КПД до 52 %.

Актуален вопрос моделирования (идентификации) параметров реального термодинамического цикла. Реальный цикл характеризуется переменными во времени скоростями и расходами рабочего тела; нестационарной температурой и сечениям тракта; низкой достоверностью определения мгновенных значений теплоотдачи в условиях нестационарных турбулентных потоков рабочего тела. При этом наиболее сложный расчет регенератора требует обязательной корректировки по экспериментальным данным.

Тракт рабочего тела ДС имеет проточную часть, состоящую из горячего объема (расширения) и холодного объема (сжатия). Объемы соединены последовательно теплообменниками — охладителем, регенератором и нагревателем (рис. 1).

Для привода поршней, обеспечивающих передвижение рабочего тела по тракту, применяются различные механизмы [2, 3]. Как отмечено авторами [4], «.. наиболее рациональным приводом

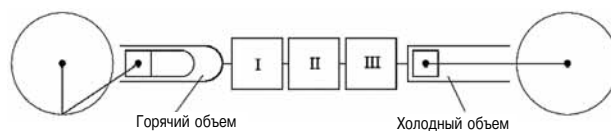
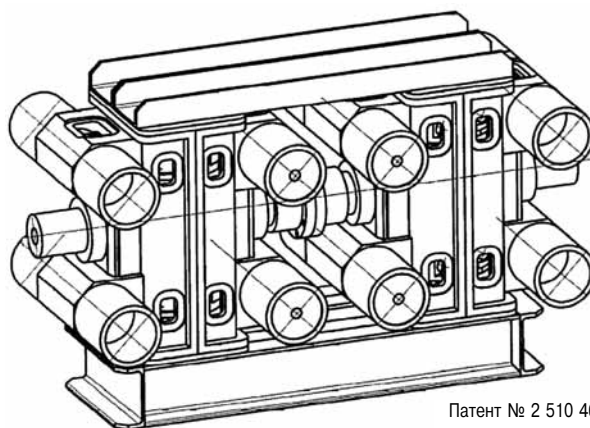


Рис. 1. Тракт рабочего тела ДС:

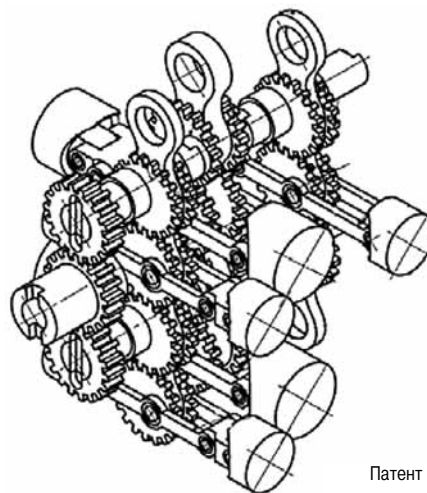
I — нагреватель, II — регенератор, III — холодильник

для ДВПТ в настоящее время является кривошипно-шатунный механизм (КШМ) крещкопфного типа, а наиболее перспективным для создания высокоэффективных компактных ДВПТ является бесшатунный механизм (БМ) С.С. Баландина».

При всех своих достоинствах бесшатунный механизм С.С. Баландина удобен для применения в авиационной и, возможно, космической технике. В наземных и подводных транспортных или стационарных энергетических установках его применение сопряжено с целым рядом трудностей, например — сложностью обслуживания и ремонта в стесненных условиях. Поэтому продолжают поиски бесшатунных механизмов других конструктивных схем для ДС большой мощности (рис. 2).



Патент № 2 510 462



Патент № 2 525 342

Рис. 2. Бесшатунные механизмы, запатентованные в РФ



Рис. 3. ДВС 2Д-200 с бесшатунным силовым механизмом конструкции А.И. Костина

В отличие от вышеприведенных пока не созданных в металле и еще не испытанных механизмов рассматривается также вариант построения ДС на основе бесшатунного механизма конструкции А.И. Костина (Патент РФ на изобретение № 2117791) [5]. Механизм показал свою работоспособность по результатам стендовых испытаний ДС 2Д-200 мощностью 16,5 кВт (рис. 3).

Для проектирования ДС на основе данного механизма были проведены специальные экспериментальные исследования [6]. Они позволили уточнить влияние схемы механизма на условия работы уплотнений, в частности — вибрационных нагрузок в крайних положениях поршней.

Совместно с ООО «Тепловые моторы» (Москва) был спроектирован базовый модуль ДС с бесшатунным силовым механизмом (патент РФ на полезную модель № 163936). В качестве примера приведена схема ДС из четырех модулей суммарной мощностью 20 кВт (рис. 4).

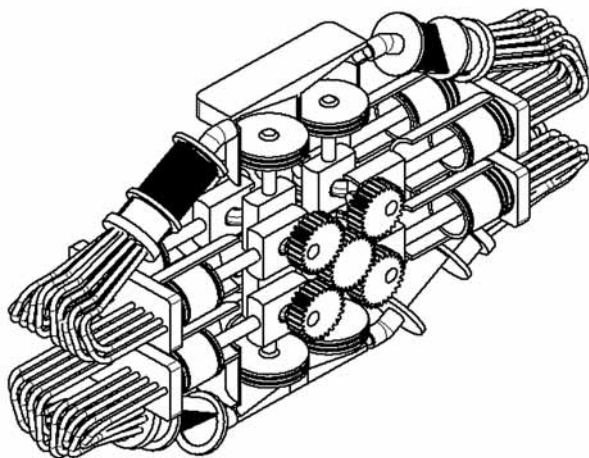


Рис. 4. Схема ДС (4 модуля) мощностью 20 кВт

К сожалению, остро ощущается нехватка квалифицированных специалистов, что сдерживает развитие НИОКР в области развития теории и конструкции ДС. Прежде всего это связано с отсутствием в учебных планах технических университетов специализированных дисциплин по тематике ДВПТ и, в частности, ДС.

Применительно к образовательным целям введение в учебный процесс изучения теории и конструкции ДС обладает целым рядом преимуществ.

1. *Наукоемкость.* При рассмотрении рабочего процесса решаются задачи нестационарных процессов теплообмена и газодинамики; при проектировании узлов — задачи механической и термической прочности. Дополнительно необходимо решать вопросы, уравнивания силового механизма, создания уплотнений, работающих без смазки, разработка системы управления двигателем для эффективного подвода теплоты в цикл и т. д.

2. *Безопасность.* Рабочий процесс двигателя осуществляется за счет циклического охлаждения и нагревания рабочего тела. В отличие от ДВС процесс горения топлива стационарный, его легче контролировать, так как горелка вынесена за пределы двигателя. Кроме того, при необходимости процесс горения топлива можно заменить электрическим нагревом.

3. *Разнообразие конструкций.* В свободном доступе размещено множество материалов по изготовлению маломощных моделей двигателей, в том числе при помощи аддитивных технологий. Это обеспечивает возможности изучения применяемых конструктивных решений и проведения оптимизации параметров двигателей, в том числе за счет применения различных конструктивных материалов.

В рамках университетского технического образования изучение ДС позволит упростить создание современных опытных образцов и серийных изделий. Объединяя материал нескольких учебных курсов, структурируя полученные знания, изучая конструкции на примере простейших действующих моделей, студенты приобретают необходимый уровень знаний, умений, навыков и компетенций.

Одним из основных препятствий для рационального использования ДС в качестве материальной учебной базы является отсутствие многофункционального учебно-демонстрационного двигателя.

В СССР подобный двигатель был разработан киевским кооперативом «Плазматрон» и некоторое время выпускался под названием УДС-1 (рис. 5, табл. 1) [7]. Достаточно удачная конструкция отлично иллюстрирует работу ДС, однако с точ-

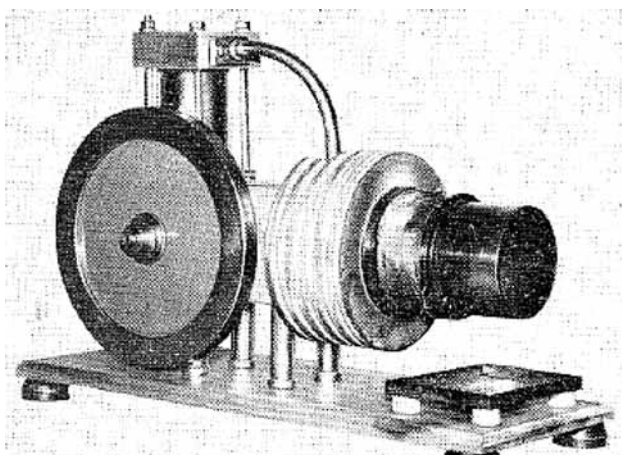


Рис. 5. Учебно-демонстрационный двигатель Стирлинга УДС-1 [7]

Таблица 1

Характеристики УДС-1

Параметр	Значение
Эффективная мощность, Вт	5–6
Частота вращения выходного вала, об/мин	500–900
Ход поршня и вытеснителя, мм	30
Рабочее тело	воздух
Габаритные размеры, мм	340×160×170
Масса, кг	5

ки зрения отработки новых узлов перспективных двигателей она малоприменима.

Для образовательных и научно-исследовательских целей в Челябинском высшем военном автомобильном командно-инженерном училище (военном институте) имени главного маршала бронетанковых войск П.А. Ротмистрова применялась установка для утилизации теплоты отработавших газов ДВС. Она состояла из ДС 5,5/2,1 вытеснительного типа β-модификации с ромбическим приводом и электрическим генератором (рис. 6). Ее основные характеристики: эффективная мощность — 225 Вт; частота вра-

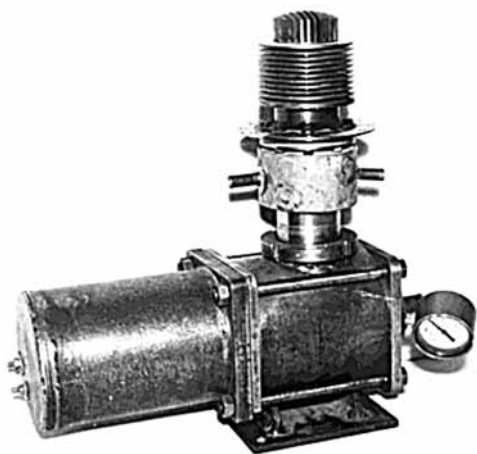


Рис. 6. Установка с ДС 5,5/2,1 [8]

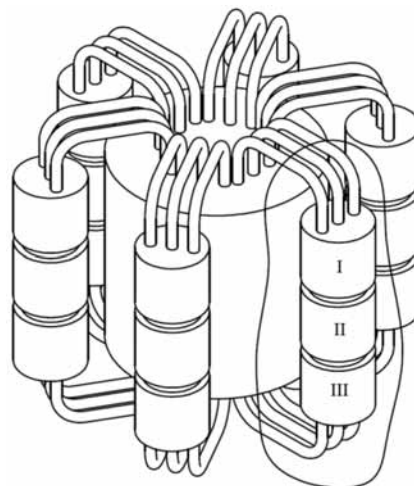


Рис. 7. ДС из одностипных контуров:

I — нагреватель, II — регенератор, III — холодильник

щения коленчатого вала — 1700 об/мин; рабочее тело ДС — гелий [8].

На базе установки с ДС 5,5/2,1 проводились различные исследования, результаты которых вошли в несколько диссертационных работ. В то же время сравнительно малая мощность образца затрудняет его широкое применение для учебно-научных целей в дальнейшем.

На современном этапе наиболее актуальны вопросы физического и математического моделирования процессов теплообмена во внутреннем корпусе мощных двигателей. Для решения этих задач мощный ДС составляется из параллельно расположенных одностипных контуров (рис. 7). При этом «базовый» контур выполняется и отработывается на малом экспериментальном стенде, повторяя без масштабирования параметры теплообменников, что позволяет создать расчетные модели реально протекающих процессов в переменных объемах [9, 10]. Конструкция такого экспериментального стенда разрабатывается в настоящее время. Ее реализация позволит с минимальными затратами испытывать теплообменники ДС в условиях реального термодинамического цикла и получать объективные данные необходимые для развития теории и методов проектирования ДС на стадии их разработки.

Специалисты ООО «Тепловые моторы» (Москва) и кафедры гидравлика Инженерно-строительного института ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» разработали двигатель, сконструированный по модульному принципу, описанному выше. Составные части ДС представляют собой законченные изделия, конструкцию которых можно моделировать в широких пределах (рис. 8, табл. 2).

Помимо исследования отдельных элементов, такой ДС позволяет проводить испытания раз-

Таблица 2

Характеристики экспериментального ДС

Параметр	Значение
Эффективная мощность, Вт	1000
Количество подводимой энергии, Вт	4000
Частота вращения выходного вала, об/мин	1500
Тип компоновочной схемы	Альфа
Рабочее тело	Воздух, гелий, азот
Рабочее давление, МПа	10
Рабочий объем, см ³	40
Габаритные размеры, мм	473×205×257
Масса, кг	38

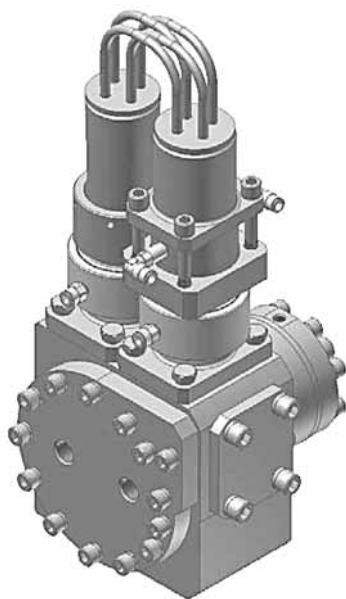


Рис. 8. ДС конструкции М.М. Ткаченко и В.С. Дворцова для малого экспериментального стенда

личных конструкционных материалов и наблюдать их поведение в условиях реальной работы.

Двигатель имеет картерную полость, находящуюся под средним давлением цикла. Генератор находится в картерной полости и соединен с окружающей средой при помощи герметичных выводов. Предусмотрена возможность работы генератора в режиме стартера для запуска ДС.

Режим работы двигателя регулируется изменением давления в буферной полости, роль которой выполняет картер. Для контроля параметров в картере двигателя в его крышку установлен манометр (0–12 МПа) и термопара (0–350 °С). Частота вращения вала контролируется магнитным датчиком в картере.

В заключение считаем необходимым отметить, что положительным примером подготовки высококвалифицированных кадров является опыт МВТУ им. Баумана (Москва). В 1974 г. доцент кафедры Э-2 Ефимов С.И. организовал новую

специализацию — «Двигатели с внешним подводом теплоты». В результате проведения большого объема учебно-методической и организационной работы по подготовке и постановке новых лекционных курсов и лабораторных работ, студентам читались лекции по дисциплинам: «Спецглавы теории ДВПТ», «Спецдвигатели с ВПТ», «Источники тепловой энергии двигателей с ВПТ», «Силовые установки с ДВПТ», «Проектирование двигателей с ВПТ» [11].

К сожалению, в настоящее время больше ни один из технических университетов нашей страны не сумел организовать подготовку специалистов по крайне востребованному и перспективному типу двигателей.

Современный ВПК России способен решить любую задачу создания установки с ДС для космоса, подводного применения или других целей. Для этого требуются не только пресловутые «деньги, время и политическое решение». Не менее важно научное сопровождение подобных проектов, а оно невозможно без воссоздания разрушенной за 25 прошедших лет отечественной экспериментальной базы и должным образом выстроенной системы подготовки высококвалифицированных кадров — проектантов, конструкторов и испытателей.

Литература

1. Автомобильный многоцилиндровый паровой двигатель // Автостроение за рубежом. — 2003. — № 3. — С. 8–11.
2. Столяров С.П. Дизели Стирлинга. Проблемы XXI века. Инженерные проблемы маркетинга // Двигателестроение. — 2002. — № 1. — С. 9–12.
3. Столяров С.П. Двигатели Стирлинга: проблемы XXI века. Кинематические механизмы // Двигателестроение. — 2002. — № 2. — С. 3–6.
4. Дядик А.Н., Замуков В.В., Дядик В.А. Корабельные воздухонезависимые энергетические установки. — СПб : Судостроение, 2006. — 424 с.
5. Кукис В.С., Куколев М.И., Костин А.И., Дворцов В.С., Ноздрин Г.А., Абакишин А.Ю. Перспективы улучшения характеристик двигателя Стирлинга // Двигателестроение. — 2012. — № 3. — С. 3–6.
6. Дворцов В.С. Динамическое моделирование бесшатунного силового механизма // Научно-технические ведомости СПбГПУ. — 2015. — № 3 (226). — С. 102–110.
7. Долганов К.Е., Лисица В.П. Учебно-демонстрационный двигатель Стирлинга // Двигателестроение. — 1989. — № 5. — С. 28, 33.
8. Кукис В.С., Романов В.А. Использование двигателей Стирлинга в когенерационных системах. — Saarbrücken: Palmarium Academic publishing, 2013. — 282 с.
9. Ткаченко М.М. Совершенствование узла горячего цилиндра с целью повышения мощности и экономичности двигателя Стирлинга: автореферат дис. ... канд. техн. наук. — Ленинград, 1985.
10. Ткаченко М.М., Иванченко Н.Н. Особенности расчета поля температур «горячего» цилиндра ДВПТ // Двигателестроение. — 1985. — № 1. — С. 8–10.
11. <http://piston-engines.ru/o-kafedre/nasha-pamyat/145-efimov-s-i>