

УДК 621.486

Д.В. Мешков, канд. тех. наук, Д.К. Ободец, студ., Е.Н. Ижболдин, студ.

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДВИГАТЕЛЯ СТИРЛИНГА В ГИБРИДНЫХ СИЛОВЫХ УСТАНОВКАХ АВТОМОБИЛЯ

### Введение

Ввиду постоянно ужесточающихся требований к эксплуатационным качествам автомобильного двигателя, а именно к снижению расхода топлива и выбросов с отработавшими газами вредных веществ, имеет смысл рассматривать самые различные способы экономии топлива.

### Формулирование проблемы

Одним из перспективных направлений развития транспортных силовых установок является использование гибридных приводов.

Наиболее распространённая схема гибрида – «двигатель внутреннего сгорания (ДВС) — генератор — аккумулятор — привод». Такая схема обеспечивает работу ДВС в наиболее оптимальном режиме (максимум КПД, максимум экономичности, минимум вредных выбросов).

Однако такая схема не избавляет ДВС от основных его недостатков, а именно: выброс вредных веществ (ВВ) с отработавшими газами (ОГ), шум, вибрация и самое главное – использование углеводородного топлива.

### Пути решения проблемы

В статье предлагается рассмотреть возможность замены ДВС двигателем Стирлинга (ДС).

В мировых обзорах по энергопреобразующей технике, двигатель Стирлинга рассматривается как

двигатель, обладающий наибольшими возможностями для дальнейшей разработки. Низкий уровень шума, малая токсичность отработавших газов, возможность работы на различных топливах, большой ресурс, сравнимые размеры и масса, хорошие характеристики крутящегося момента - все эти параметры дают возможность ДС в ближайшее время значительно потеснить ДВС [1]. ДС относится к классу двигателей с внешним подводом теплоты. В связи с этим, по сравнению с ДВС, в ДС процесс горения осуществляется вне рабочих цилиндров и протекает более равномерно, рабочий цикл реализуется в замкнутом внутреннем контуре при относительно малых скоростях повышения давления в цилиндрах двигателя, плавном характере теплогидравлических процессов рабочего тела внутреннего контура, при отсутствии газораспределительного механизма клапанов. Необходимо отметить, что рядом зарубежных фирм начато производство ДС, технические характеристики которых уже сейчас превосходят ДВС и газотурбинные установки. Так, ДС фирм Philips, STM Inc., Daimler Benz, Solo, United Stirling мощностью от 5 до 1200 кВт имеют эффективный КПД более 42%, ресурс—более 40 тыс. ч, удельную массу—от 1,2 до 5,0 кг/кВт [2, 3]. В таблице 1 представлены основные технические характеристики зарубежных ДС [3].

Таблица 1. Технические характеристики зарубежных ДС

Фирма	Марка	Мощность, кВт	Удельная масса, кг/кВт	Ресурс, часов	Эффективный КПД, %
Philips	4 × 235	150	5,0	10 000	28
	4-S-1210	265	3,8	10 000	30
STM Inc.	STM 4-120	52	2,1	50 000	45
	SM-3	40		50 000	40
Daimler Benz	KS15D	15	3,7		37,1
Solo	V-160	7.5	2,3	28 000	35
MTI	Mod - III	108	3,0	20 000	36
	4-95	52	4,1	20 000	41
United Stirling	V4X	1250	1,2	10 000	30

ДС имеют следующие **преимущества**. В ДС можно использовать любое дешевое топливо: газ, уголь, дрова и даже торф. При этом, в отличие от ДВС, топливо сжигается непрерывно при низком давлении и оптимальном избытке воздуха в камере сгорания, расположенной вне рабочего объема.

Содержание ВВ в ОГ при таких условиях уменьшается до минимума, а количество выделяемой энергии увеличивается. Кроме традиционных топлив, для ДС пригодны другие источники тепла: расплавы солей, радиоизотопы, а также ядерная и солнечная энергия и т. п.

Внутренний объем ДС герметичен, поэтому в него не попадает абразивная пыль, масло не соприкасается с продуктами горения и не окисляется (следовательно, почти не расходуется). Благодаря плавности рабочего процесса снижаются вибрация и нагрузки на все трущиеся элементы двигателя.

Эти особенности делают ДС более надежным и долговечным по сравнению с ДВС, позволяют использовать его длительное время без обслуживания. Принцип внешнего подвода теплоты обеспечивает быстрый и безотказный запуск при низких температурах.

В дополнение к этим качествам ДС практически бесшумен, так как он работает без клапанов и не имеет резкого пульсирующего выхлопа. ДС с ромбическим механизмом является идеально сбалансированным устройством и, при достаточно высоком качестве изготовления, даже не имеет вибраций (амплитуда вибрации меньше 0,0038 мм) [4].

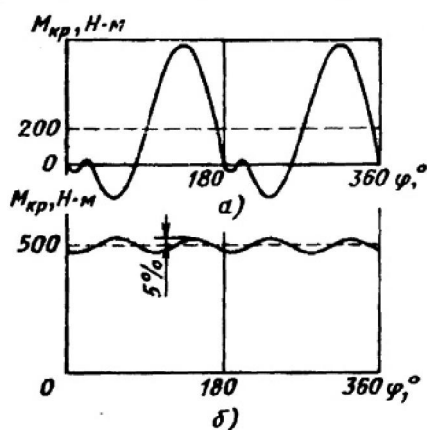


Рис. 1. Изменение крутящего момента за цикл двигателя Стирлинга и бензинового ДВС [5]  
 а – бензиновый двигатель (четырёхцилиндровый, четырёхтактный  $n = 3800$  об/мин, мощность  $N_e = 74$  кВт);  
 б – четырёхцилиндровый двигатель Стирлинга ( $n = 1500$  об/мин,  $N_e = 73$  кВт)

К тому же ДС имеет весьма хорошие циклические характеристики крутящего момента, т.е. незначительное изменение крутящего момента за один оборот вала. Неравномерность изменения крутящего момента за цикл ДС намного меньше, чем у ДВС той же мощности. Это объясняется небольшим значением отношения давления ( $p_{max}/p_{min} = 2$ ), а так же тем, что полный цикл в каждом цилиндре совершается за один оборот вала. Данное преимущество существенно влияет на размер маховика [5].

Как видно из графика (рис. 2), двигатель Стирлинга имеет особое преимущество, в том что

его КПД при малой мощности падает в значительно меньшей степени, чем у ДВС [2].

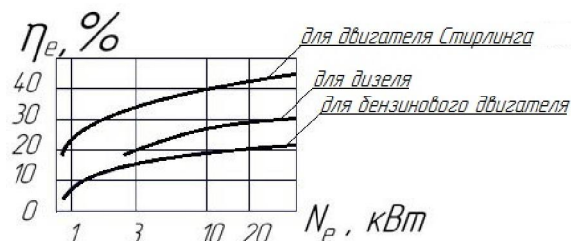


Рис. 2. Зависимость эффективного КПД тепловых двигателей поршневого типа от мощности на валу

К недостаткам двигателя Стирлинга следует отнести следующее:

- *Материалоёмкость* — основной недостаток двигателя. У двигателей внешнего сгорания вообще, и ДС в частности, рабочее тело необходимо охлаждать, и это приводит к существенному увеличению массо-габаритных показателей силовой установки за счёт увеличенных радиаторов.

- Для получения характеристик (удельный эффективный расход топлива, удельная мощность, эффективная мощность), сравнимых с характеристиками ДВС, приходится применять высокие давления (свыше 10 МПа) и специальные виды рабочего тела — водород, гелий.

- *Теплота не подводится к рабочему телу непосредственно*, а только через стенки теплообменников. Стенки имеют ограниченную теплопроводность, из-за чего КПД оказывается ниже, чем можно было ожидать. Горячий теплообменник работает в очень напряжённых условиях теплопередачи, и при очень высоких давлениях, что требует применения высококачественных и дорогих материалов. Создание теплообменника, который удовлетворял бы противоречивым требованиям, весьма трудно. Чем выше площадь теплообмена, тем меньше потери тепла. При этом растёт размер теплообменника и объём рабочего тела, не участвующий в работе [4].

И так, ещё раз кратко определим, что:

Отношение мощности к массе у ДС сопоставимо с аналогичным показателем дизеля с турбонаддувом. Удельная мощность на выходе такая же, как и у дизеля. Крутящий момент практически не зависит от скорости. ДС реагирует на изменения нагрузки аналогично дизелю, однако требует более сложной системы регулировки. Он более сложен, чем обычные тепловые двигатели, стоимость его изготовления выше стоимости изготовления ДВС, но, расходы на эксплуатацию гораздо меньше.

Одним из сдерживающих факторов, который ограничивает применение ДС на легковых автомобилях – медленная разгонная динамика. Но приме-

нение ДС в качестве генератора исключает этот недостаток.

Таким образом, оценив все преимущества и недостатки, можно прийти к мнению о необходимости использования ДС в качестве силовой установки на автомобиле. Предлагается следующая концепция гибридного автомобиля: ДС — генератор — аккумулятор — привод.

В качестве двигателя-прототипа целесообразно использовать двигатель STM Inc "SM-3". Двигатель занимает практически столько же места, сколько и ДВС с принудительным зажиганием равной мощности. Удельная масса двигателя равна 3,5 кг/кВт при максимальной мощности 50 кВт. Эффективный КПД равен 40%. Холодный пуск двигателя длится 15 с, расход топлива на 25 % меньше, чем в случае обычного бензинового двигателя. Регулирование мощности двигателя производится изменением количества и давления рабочего тела [3,6]. Так же не следует забывать и о роторном варианте ДС. В отличие от двигателя Ванкеля, в нашем случае отсутствует «внутреннее» сгорание, тем самым решается проблема смазки.

В качестве базового автомобиля целесообразно выбрать автомобиль «Sens», который выпускает Запорожский автомобильный завод «АвтоАЗ».

Проблемы создания высокоэффективных ДС.

Основные проблемы, возникающие при создании высокоэффективных ДС и сдерживающие до сих пор их широкое применение в различных областях техники. Сложность расчета проектируемого двигателя определяется сложностью реализации термодинамического цикла Стирлинга в реальных машинах, что обусловлено нестационарностью тепломассового обмена во внутреннем контуре, ввиду непрерывности движения поршней. Отсутствие адекватных математических моделей и методов расчета являются главными причинами неудач ряда известных зарубежных фирм и отечественных предприятий, пытавшихся без серьезной научной проработки, только за счет приблизительного расчета и экспериментальных доводов решить вопрос создания как двигателей, так и холодильных машин Стирлинга.

В настоящее время западные фирмы, ведущие разработки в данной области, в основном опираются на теоретические и экспериментальные исследования своих научных подразделений, технических университетов или создают технопарки по разработке отдельных типов ДС.

Далее, это сложность конструктивного исполнения отдельных узлов, проблемы в области уплотнений, регулирования мощности и т.д. Особенности конструктивного исполнения обуславливаются применяемыми рабочими телами. Так, на-

пример, гелий, обладает сверхтекучестью, что определяет повышенные требования к уплотняющим элементам рабочих поршней, штока вытеснителя и т.д.

Третья проблема - это высокий уровень технологии производства. Данная проблема связана с необходимостью применения в ДС жаростойких сплавов и цветных металлов, их сварки и пайки. Отдельный вопрос – изготовление регенератора и насадки для него, для обеспечения с одной стороны высокой теплоемкости, а с другой стороны, низкого гидравлического сопротивления. Все это требует высокой квалификации рабочего персонала и современного технологического оборудования [3].

#### Выводы

Исходя из вышесказанного видно, что применение ДС в качестве силовой установки на гибридных автомобилях является актуальным и возможным. При условии создания адекватного математического описания и методов расчета проектируемых машин Стирлинга, которые являются основными сдерживающими факторами широкого распространения машин, работающих по циклу Стирлинга.

Установка на автомобили, к примеру «Sens» гибридной силовой установки с ДС позволит решить ряд проблем: снизить выброс ВВ с ОГ, шум, вибрацию, автомобиль «Sens», оборудованный ДС, без дорогостоящих катализаторов способен выполнить нормы ЕВРО IV. «Всеядность» ДС позволит в значительной степени снизить импорт нефтяных топлив.

#### Список литературы:

1. Статья «Двигатель Стирлинга» - Ведущий рубрики КП, Юрий Даниловский: <http://www.metodolog.ru/node/220>.
2. <http://stirling-generator.ru/index.php>.
3. Статья «Машины стирлинга - новое перспективное направление в развитии отечественного машиностроения»: <http://energyua.com/2007/06/30/844.html>.
4. Свободная общедоступная мультязычная универсальная интернет-энциклопедия: <http://www.wikipedia.org/>.
5. Уокер Г. Двигатели Стирлинга / Сокр. пер. с англ. Б. В. Сутугина и Н. В. Сутугина. – М.: Машиностроение, 1985. – 408 с., ил.
6. Сайт «Стирлингмаши»: <http://www.stirling.ru/index.html>.
7. Walker, G. Stirling-Cycle Machines. - Oxford University Press, 1973. – 156 с.

#### Bibliography (transliterated):

1. Stat'ja «Dvigatel' Stirlinga» - Veduwij rubriki KP, Jurij Danilovskij: <http://www.metodolog.ru/node/220>.
2. <http://stirling-generator.ru/index.php>.
3. Stat'ja «Mashiny stirlinga - novoe perspektivnoe napravlenie v razviii otechestvennogo mashinostroenija»: <http://energyua.com/2007/06/30/844.html>.
4. Svobodnaja obwedostupnaja mul'tijazychnaja universal'naja internet-jenciklopedija: <http://www.wikipedia.org/>.
5. Walker G. Stirling Engines / Sokr. per. s angl. B. W. Sutugina and N. W. Sutugina. – M.: Mashinostroenie, 1985. – 408 s., il.
6. Sajt «Stirling-mash»: <http://www.stirling.ru/index.html>.
7. Walker, G. Stirling-Cycle Machines. - Oxford University Press, 1973. – 156 с.