

УДК 621.4

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СВОБОДНОПОРШНЕВЫХ ТЕПЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В СОСТАВЕ ТРАНСПОРТНЫХ И СТАЦИОНАРНЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК

Шустров Ф.А., Иванов Д.А., Татарников А.П.

ФГБОУ ВПО «Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)»  
(Университет машиностроения), Москва, e-mail: shustrov@yandex.ru

В статье приведен сравнительный анализ показателей свободнопоршневых и традиционных двигателей внутреннего и внешнего сгорания при их эксплуатации в составе энергоустановок различного назначения. Оценка экономических, энергетических, экологических и основных эксплуатационных показателей существующих образцов рассматриваемых тепловых двигателей продемонстрировала превосходство свободнопоршневых двигателей над традиционными, использующими кривошипно-шатунный механизм, и позволила определить наиболее рациональные области их применения. Обоснована целесообразность использования свободнопоршневых двигателей внутреннего сгорания в составе бортовых энергоустановок легковых транспортных средств и малой авиации, что обусловлено их меньшей стоимостью и лучшими массогабаритными показателями, а свободнопоршневых двигателей внешнего сгорания в стационарных объектах систем комплексного энергоснабжения, на железнодорожном, водном, грузовом и общественном автомобильном транспорте, а также в аэрокосмической отрасли, что объясняется большим ресурсом, лучшей топливной экономичностью и возможностью использовать широкую топливную номенклатуру.

**Ключевые слова:** двигатели внутреннего сгорания, двигатели внешнего сгорания, кривошипно-шатунный механизм, свободнопоршневой двигатель, линейный генератор

## EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF THE USE OF FREE-PISTON HEAT ENGINES IN THE TRANSPORT AND STATIONARY POWER PLANTS

Shustrov F.A., Ivanov D.A., Tatarnikov A.P.

Federal State Educational Institution of Higher Professional Education «Moscow state university of mechanical engineering (MAMI)», Moscow, e-mail: shustrov@yandex.ru

The article presents comparative analysis of free-piston and conventional engines of internal and external combustion engines during their operation in the composition of power plants for various purposes. Assessment of economic, energy, environmental, and basic operational parameters of existing samples of the considered heat engines have demonstrated the superiority of free-piston engines over traditional using a crank mechanism, and allowed to determine the most efficient applications. The appropriateness of the free-piston internal combustion engines in the onboard power passenger vehicles and small aircraft due to their lower cost and better weight indicators and free piston external combustion engines in stationary objects of integrated power supply systems, railway, water, freight and public road transport, as well as in the aerospace industry, because of the large resource, better fuel economy and the ability to use a wide fuel range.

**Keywords:** internal combustion engines, external combustion engines, crank mechanism, the free-piston engine linear generator

Развитие технологий во всех областях жизнедеятельности человека, а также улучшение мирового экономического климата в 20 веке привело к резкому демографическому росту, при этом население Земли за последние 100 лет выросло более, чем в 5 раз, а учитывая прогнозы специалистов, ожидается дальнейшее увеличение общей численности населения до 2050 г. примерно на четверть от уровня 2015 г. По мере роста численности населения наблюдается тенденция постоянно растущего спроса на энергоресурсы во всех областях деятельности человека [1], вследствие чего неминуемо будет происходить удорожание нефтепродуктов, что, с одной стороны, приведет к увеличению стоимости энергоресурсов, будь то бензин или электроэнергия, с другой стороны, приведет к росту популярности технологий в области альтернативной энергетики.

На сегодняшний день тепловые двигатели являются основой энергоустановок как в транспортной отрасли, так и на стационарных объектах малой энергетики. Наибольшее распространение в данных областях хозяйственно-экономической деятельности человека получили двигатели внутреннего сгорания (ДВС) с кривошипно-шатунным механизмом (КШМ), что в основном связано с простотой и технологичностью их изготовления, а также удовлетворительными энергоэффективными и экологическими показателями. К настоящему времени развитие технологий позволило существенно улучшить как экономические, так и экологические показатели данного типа двигателей.

Альтернативой ДВС, начавшей набирать популярность во второй половине 20 века, являются двигатели с внешним подводом теплоты, работающие по циклу Стирлинга. Данные двигатели обладают лучшими эко-

логическими и экономическими показателями в сравнении с ДВС, однако внедрение их ограничено зачастую вследствие необходимости применения достаточно сложных, дорогостоящих, на настоящий момент, технологий, в частности, из области водородной энергетики. В настоящий момент энергоустановки с двигателями Стирлинга (ДС) нашли применение в стационарных энергообеспечивающих объектах, а также в некоторых отраслях транспорта, например, на подводных лодках и космических кораблях. Такое избирательное применение обусловлено много топливностью данного типа двигателей, при этом в качестве источника энергии ДС может использовать не только энергию сгорания традиционных углеводородных топлив, но и местные виды топлива, например, попутный нефтяной газ или отходы деревообрабатывающего производства, и даже геотермальную или солнечную энергию.

Помимо совершенствования энергоэффективных показателей энергоустановок, используемых в автомобильной отрасли и в малой энергетике, важнейшим стимулом развития является улучшение их экологических показателей. Непрерывное ужесточение нормативов по выбросам вредных веществ с отработавшими газами автомобильных двигателей, а также ограничение выбросов предприятиями энергетического комплекса приводит к необходимости поиска новых технических решений по созданию перспективных экологически безопасных и экономичных тепловых двигателей. Уже сейчас внимание всех без исключения исследователей и разработчиков в области энергоэффективного преобразования энергии сконцентрировано на создании новых типов двигателей, а также применении альтернативных топлив и видов энергии. Одним из таких решений, направленным на решение проблем снижения расхода топлива нефтяного происхождения, а также обеспечение перспективных требований к выбросам вредных веществ, является разработка и внедрение энергоустановок на базе свободнопоршневых тепловых двигателей, а именно свободнопоршневых ДВС (СПДВС) и свободнопоршневых ДС (СПДС).

#### **Обоснование преимуществ СПДВС**

Интерес к исследованиям свободнопоршневых двигателей возник не случайно и обусловлен рядом преимуществ в сравнении с классическими ДВС с КШМ. Одним из таких преимуществ является относительная простота конструкции. По сравнению с классическим двигателем с КШМ СПДВС обладает на 40 % меньшим количеством элементов и в нем отсутствуют вращающиеся

части, что позволяет, во-первых, улучшить массогабаритные показатели двигателя, во-вторых, снизить инерционные нагрузки на детали двигателя. Также следует отметить, что СПДВС, ввиду меньшего числа пар трения и отсутствия боковой силы воздействия юбки поршня на зеркало цилиндра, вследствие отсутствия перекадки поршня в крайнем верхнем положении, обладают меньшими механическими потерями. Механический КПД СПДВС может достигать значения 0,93–0,95, что существенно превышает уровень ДВС с КШМ, находящийся в диапазоне 0,8–0,85. Также не стоит забывать, что более простая конструкция в сравнении с двигателями с КШМ позволяет существенно снизить расходы на изготовление, эксплуатацию и обслуживание энергоустановок с такими силовыми агрегатами.

Еще одним преимуществом СПДВС при его использовании совместно с линейными электрическими генераторами является возможность непрерывного изменения геометрической степени сжатия в двигателе, за счет чего, во-первых, двигатель, при внесении незначительных изменений в конструкцию системы топливоподачи, может работать на более широкой номенклатуре топлив, включая автомобильные бензины всех марок, дизельное топливо и различные виды газового топлива, а во-вторых, в случае использования бензина в двигателе может быть реализован процесс управляемого самовоспламенения HCCI (Homogeneous charge compression ignition), позволяющий существенно улучшить показатели топливной экономичности.

В качестве дополнительного преимущества СПДВС можно выделить их модульность. В зависимости от требуемых энергетических параметров используемой энергоустановки возможно использование нескольких модулей равной мощности, что позволит получить лучшие массогабаритные показатели, а также повысить удобство компоновки такой установки, в том числе на борту автомобиля, в сравнении с энергоустановкой на базе ДВС с КШМ с эквивалентными энергетическими показателями.

При всем многообразии преимуществ СПДВС не обделены недостатками, рассмотрение которых целесообразно проводить для каждого из существующих типов таких двигателей.

Так, одноцилиндровый СПДВС является неуравновешенным в части сил инерции, что является причиной повышенного виброакустического воздействия на окружающую среду при его работе. Кроме того, так как для осуществления такта сжатия используется только энергия нагнущо-

го устройства, которую может выполнять электрическое, гидравлическое, пневматическое устройство или т.п., для данного типа СПДВС предпочтителен двухтактный процесс работы для снижения количества преобразований энергии. Также следует отметить, что СПДВС, причем это касается всех типов, не содержат в конструкции каких-либо вращающихся частей, что создает трудность для классического привода газораспределения через распределительный вал, а непосредственный привод клапанов существует на данный момент лишь в виде лабораторных образцов.

Что касается двухцилиндровых СПДВС, их недостатки разделяются по видам связи поршней, а именно, с жесткой связью поршней и без жесткой связи. Двухцилиндровый СПДВС с жестко связанными поршнями обладает всеми преимуществами одноцилиндрового двигателя и позволяет использовать энергию от сгорания топлива в одном цилиндре, для осуществления процесса сжатия в другом цилиндре, однако недостатком данной концепции является неуравновешенность сил инерции от движущихся частей, причем, в большей степени, чем в одноцилиндровом двигателе, в связи с тем, что масса подвижных частей увеличивается за счет второго поршня и удлинения штока. Помимо увеличения массы существует еще ряд трудностей, связанных с контролем процесса сгорания, равномерностью работы цилиндров в связи с тем, что процессы в обоих цилиндрах жестко связаны.

Конструкция двухцилиндровых свободнопоршневых ДВС без жесткой связи поршней характеризуется наличием единой камеры сгорания, расположенной между поршнями. Представленная схема имеет один цилиндр, в котором поршни движутся навстречу друг другу. Существенным преимуществом данной схемы является полная уравновешенность сил инерции, что позволяет избавиться от вибрации и шума при работе двигателя. Кроме того, единая камера сгорания позволяет нивелировать неравномерность работы по цилиндрам. Схема двигателя с противоположно движущимися поршнями предусматривает только двухтактный рабочий процесс с газообменом через впускные и выпускные окна и общей камерой сгорания и в настоящее время является наиболее оптимальной для реализации.

#### **Обоснование преимуществ СПДС**

При сохранении преимуществ ДС с КШМ в свободнопоршневых аналогах конструкция, благодаря отсутствию в ней приводного механизма, потенциально позволяет увеличить надежность и ресурс при

одновременном снижении периодичности технического обслуживания. Для достижения высоких эффективных показателей СПДС в качестве рабочего тела используются газы с малой молекулярной массой, обеспечивающей течение газа внутри рабочего контура двигателя с относительно низкими аэродинамическими потерями. Приведенным требованиям полностью соответствуют газообразный водород и гелий. Однако эти газы способны диффундировать в металл, а диффузия водорода в металл приводит к водородной деградации материала, которая проявляется в виде охрупчивания и возникновения риска разрушения конструкции.

СПДС обладают такими же преимуществами, как и СПДВС перед кривошипно-шатунными схемами в части материалоемкости, простоты конструкции, меньшей величины потерь на трение и модульности.

Все ДС, использующие КШМ, несмотря на предпринимаемые меры по совершенствованию конструкции, сталкиваются с рядом серьезных технических проблем, полностью решить которые в настоящее время невозможно, даже располагая современными средствами. К таким проблемам можно отнести обеспечение долговечности подшипников и уплотнительных элементов, сложность герметизации рабочей полости для поддержания высокого давления рабочего тела, и необходимость смазки движущихся деталей. Полностью герметичная конструкция свободнопоршневых ДС исключает утечки рабочего тела. Для работы двигателя не требуется система смазки, а возможность объединения рабочего поршня и активной части электрогенератора в один узел (транслятор) обеспечивает снижение габаритных размеров энергоустановки.

#### **Сравнение технических характеристик ДВС и ДС на базе КШМ с свободнопоршневыми ДВС и ДС**

Ниже представлены результаты сравнительного анализа основных показателей традиционных ДВС и ДС, использующих в своей конструкции КШМ, с аналогичными свободнопоршневыми двигателями, обладающими эквивалентными мощностными показателями в диапазоне от 10 до 50 кВт. Оценка основных технических характеристик проводилась с использованием данных лабораторных и серийных образцов двигателей и опубликованных результатов экспериментальных исследований этих двигателей. Для получения объективной картины при сравнении технических характеристик рассматривались эффективный КПД, удельная масса и ресурс двигателей, значения которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики существующих кривошипно-шатунных и свободнопоршневых образцов ДВС и ДС

Параметр		Эффективный КПД, %	Удельная масса, кг/кВт	Ресурс, ч
Тип двигателя	Модель			
ДВС с КШМ	Серийные образцы	≈ 23	≈ 13,5	≈ 30000
СПДВС	Innas BV, Chiron <sup>2</sup> [2, 10]	50	5,3	–
	Toyota Central R&D Labs Inc. FPEG <sup>2</sup> [5]	42	–	–
ДС с КШМ	«SOLO Kleinmotoren» <sup>1</sup> [7]	25,4	45	180 000
	«United Stirling» P-40 MOD P <sup>2</sup> [9]	35–40	5,8*	–
	«United Stirling» P-40 MOD P <sup>2</sup> [9]	38	3,4*	–
СПДС	NASA (15 kW) <sup>2</sup> [3]	46	–	50 000
	SP-100 Space Reactor Program SPDE <sup>2</sup> [4]	–	12,7	60 000
	SP-100 Space Reactor Program CTPC <sup>2</sup> [4]	–	8,7	60 000
	Infinia <sup>1</sup> [6]	32	17	220 000
	«Glenn Research Center» <sup>2</sup> [8]	26,2	–	336 000

Пр и м е ч а н и е . <sup>1</sup> – серийный образец; <sup>2</sup> – экспериментальный образец; \* – без учета массы нагружающего устройства.

Таблица 2

Сравнение основных показателей кривошипно-шатунных и свободнопоршневых ДВС и ДС

Тип теплового двигателя	ДВС		ДС	
	КШМ	СП	КШМ	СП
Экономические показатели				
Эффективный КПД	γ	γγ	γγγ	γγγγ
Материалоемкость	γγγ	γγγγ	γ	γγ
Экологические показатели				
Уровень выбросов вредных веществ с ОГ	γ	γγγ	γγγ	γγγ
Виброакустические показатели	γ	γγ	γγ	γγγ
Эксплуатационные показатели				
Массогабаритные параметры	γγγ	γγγγ	γ	γγ
Многотопливность	γ	γγγ	γγγγ	γγγγ
Ресурс	γ	γγ	γγγ	γγγγ
Периодичность ТО	γ	γγ	γγ	γγγ
Масштабируемость	γ	γγ	γ	γγ

### Выводы

Сравнение осредненных экологических, экономических и пр. эксплуатационных показателей, составленное на основе анализа характеристик существующих образцов энергоустановок на базе ДВС, СПДВС, ДС и СПДС эквивалентной мощности, представлено в табл. 2. Сравнение представлено в виде балльной системы, при этом большее количество баллов («γ») соответствует высшему значению оцениваемого показателя.

Результаты проведенного исследования подтвердили положительное влияние свободнопоршневой кинематической схемы в сравнении с кривошипно-шатунной на основные показатели ДВС и ДС. Сравнивая экономические показатели, можно от-

метить, что несомненным преимуществом по тепловой эффективности обладают двигатели с внешним подводом теплоты, однако стоит подчеркнуть, что использование свободнопоршневой схемы лишь усиливает значение эффективного КПД, причем это касается и ДВС. В отношении материалоемкости, отражающей номенклатуру используемых деталей, технологичность и стоимость изготовления того или иного двигателя, кривошипно-шатунные схемы заметно отстают от свободнопоршневых, при этом разрыв наиболее заметен у ДВС.

Оценивая экологические показатели, очевидно незначительное доминирование ДС над ДВС, использующих свободнопоршневую схему в части виброакустического воздействия на окружающую среду,

а также явное превосходство каждого из указанных типов двигателей в своем сегменте над кривошипно-шатунными двигателями. В случае СПДВС основным объяснением уменьшения концентрации вредных веществ в отработавших газах является возможность управление геометрической степенью сжатия, что позволяет оптимизировать процесс сгорания в двигателе, а также реализовать процесс управляемого гомогенного самовоспламенения (НССИ). В свою очередь, уменьшение виброакустического воздействия на окружающую среду как у ДВС, так и у ДС с свободнопоршневой кинематикой объясняется, как уже было сказано ранее, меньшим количеством, а следовательно, и массой подвижных элементов, а также возможностью полного уравнивания энергоустановки от инерционных нагрузок путем использования парной схемы с противоположно движущимися поршнями.

Распределение позиций при оценке эксплуатационных показателей не так однозначно, как при вышеописанном сравнении экономических и экологических показателей. Так, в части показателей компактности и мобильности лидируют ДВС, при этом даже самые тяжелые и громоздкие ДВС с КШМ превосходят по своим массогабаритным параметрам наиболее совершенные из свободнопоршневых ДС. С точки зрения многотопливности, безусловно, доминируют ДС, т.к. они способны работать на большинстве существующих видах энергии, в т.ч. солнечной и геотермальной, однако, не стоит упускать из вида возможность применения различных видов автомобильных топлив в ДВС, которая появляется благодаря способности варьирования степенью сжатия при использовании свободнопоршневой кинематической схемы. Что касается ресурсных показателей, а также частоты проведения технического обслуживания, то по данным показателям посегментно двигатели с внешним подводом опережают ДВС, при этом данные показатели СПДВС находятся на уровне ДС с КШМ.

Завершая оценку эксплуатационных показателей, хотелось бы добавить, что применение свободнопоршневой кинематической схемы, как в случае с ДВС, так и с ДС позволяет обеспечить масштабируемость путем использования отдельных двигателей как универсальных модулей при компоновке энергоустановок различной мощности.

Подводя итоги проведенных аналитических исследований, необходимо отметить, что оптимальность применения рассмотренных видов тепловых двигателей можно оценивать лишь с позиции конкретной отрасли,

как-то, автомобильный, железнодорожный, водный, авиационный виды транспорта, стационарные объекты энергетического комплекса и использования на космических кораблях. Так, СПДВС целесообразно использовать в составе бортовых энергоустановок легковых транспортных средств и малой авиации, что обусловлено их меньшей стоимостью и лучшими массогабаритными показателями. В свою очередь, СПДВС ориентированы на использование в стационарных объектах систем комплексного энергоснабжения, на железнодорожном, водном, грузовом и общественном автомобильном транспорте, а также в аэрокосмической отрасли, что объясняется большим ресурсом, лучшей топливной экономичностью и возможностью использовать широкую топливную номенклатуру.

Результаты исследований, представленные в настоящей статье, получены в ходе выполнения НИР в рамках стипендии Президента Российской Федерации для молодых ученых и аспирантов, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики, регистрационный номер СП-264.2015.1 при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

#### Список литературы

1. Прогноз развития энергетики мира и России до 2040 года. ИНЭИ РАН, АЦ 2013.
2. Achten P.A.J., van den Oever J.P.J., Potma J., Vael G.E.M. «Horsepower with Brains: The Design of the CHIRON Free Piston Engine», SAE Paper № 2000-01-2545, 2000.
3. Dochat George R.: Design Study of a 15 kW Free-Piston Stirling Engine -Linear Alternator for Dispersed Solar Electric Power Systems. (MIT 79TR47, Mechanical Technology, Inc.; DOE Contract DEN-3-56.) DOE/NASA/O056-79/1, NASA CR-159587, 1979.
4. J.G. Slaby, «Overview of Free-Piston Stirling Engine Technology for Space Power Application.» NASA TM-88886, Lewis Research Center, Cleveland, OH (1987).
5. Kosaka H., Akita T., Moriya K., Goto S. et al. (2014) «Development of Free Piston Engine Linear Generator System Part 1 – Investigation of Fundamental Characteristics.» SAE Technical Paper 2014-01-1203 doi: 10.4271/2014-01-1203.
6. Presentation. 30 kW Maintenance Free Stirling Engine for High Performance Dish Concentrating Solar Power. Contract No. DE-FC36-08GO18032. 2010.
7. Rapport SGC 144. Demonstration Stirling Engine based Micro-CHP with ultra-low emissions. Rolf Öberg, Fredrik Olsson, Magnus Pålsson. Svenskt Gastekniskt Center (2004).
8. Wilson S.D., «Stirling Converter Extended Operation Testing Overview.» International Energy Conversion Engineering Conference, Nashville Tennessee, 2010, AIAA-2010-6694.
9. W.D. Ernst and R.K. Shaltens, «Automotive Stirling Engine Development Project.» NASA CR-190780, Mechanical Technology Incorporated, Latham NY and Lewis Research Center, Cleveland, OH (1997).
10. Chiron Free Piston Engine [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.innas.com/CFPE.html>. (дата обращения: 05.08.2015).