

## ОЦЕНКА МОЩНОСТИ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО КПД ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СТИРЛИНГА

Лоншаков А.С., Суворов Д.М.  
Вятский государственный университет  
AlexLo90@mail.ru

Термодинамический цикл, по которому работают двигатели Стирлинга, был представлен около 200 лет назад. Принцип работы заключается в постоянно чередующихся циклах нагрева и охлаждения газа в закрытом внутреннем контуре. Сегодня перспективы исследований и реализации машин Стирлинга в технике и энергетике стали очевидны для всех промышленно развитых стран мира. Это подтверждается тем, что во многих крупных компаниях США, Великобритании, Японии, Германии, Швеции, Нидерландов, а в последнее время и Китая, Австралии, Израиля, Канады и Индии приступили к интенсивным исследованиям по машинам Стирлинга. Объективно в последнее время в мире в дальнейшем развивается перспективная отрасль – стирлингмашиностроение [3]. Это можно объяснить тем, что двигатель Стирлинга, в отличие от других типов двигателей, является уникальной тепловой машиной, поскольку относится к классу двигателей с внешним подводом теплоты (ДВПТ). Это исключительное свойство позволяет применять в двигателях Стирлинга любые виды топлива как традиционные (нефтепродукты, природный газ, пропан), так и нетрадиционные (древесину, биогаз, уголь, отходы деревообрабатывающей промышленности и сельского хозяйства), а также использовать солнечную энергию, вторичные энергоресурсы [2]. Современные двигатели Стирлинга конструктивно представляют собой удачное сочетание в одном агрегате компрессора, детандера и теплообменных устройств: теплообменника нагрузки (нагревателя), регенератора и холодильника.

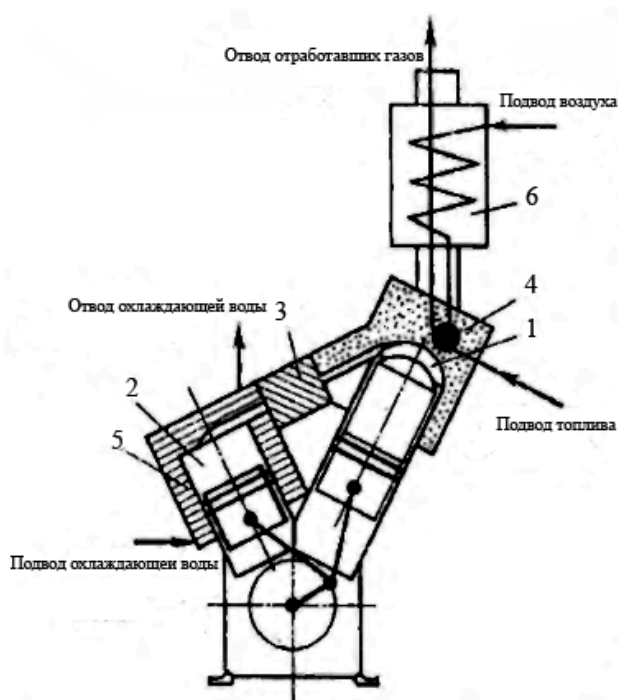


Рис. 1. Схема двигателя Стирлинга с V-образным расположением поршней:  
1 – полость расширения; 2 – полость сжатия;  
3 – регенератор; 4 – нагреватель;  
5 – холодильник;  
6 – подогреватель воздуха

Поскольку процесс горения идет вне рабочих цилиндров и протекает 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 и при отсутствии газораспределительного механизма клапанов [3]. Сейчас

наиболее перспективным направлением для применения двигателей Стирлинга является создание когенерационных установок для одновременного производства электроэнергии и тепла, которые относятся к стационарным энергетическим системам.

Экономическая рентабельность любой энергоустановки определяется в основном затратами на ее изготовление и эксплуатационными расходами. Корректная оценка стоимости двигателя Стирлинга достаточно затруднительна, но ее прогноз позволяет говорить о рентабельности производства двигателя Стирлинга в целом. Стоимость создаваемой продукции определяется прежде всего затратами на разработку конструкции, капитальное оборудование, производственными затратами, расходами на материалы, эксплуатацию и техническое обслуживание. Многие из этих составляющих зависят от массовости производства.

Профессор Бил из университета Огайо установил, что эффективная мощность многих двигателей Стирлинга может быть оценена по формуле 1

$$P = 0,15 \cdot p \cdot f \cdot V_0, \quad (1)$$

где  $P$  – эффективная мощность двигателя, Вт;  $p$  – среднее давление рабочего тела в цикле, МПа;  $f$  – частота вращения двигателя, Гц;  $V_0$  – вытесняемый рабочим поршнем объем, см<sup>3</sup>. Если данное уравнение, дающее предварительные результаты, преобразовать к безразмерному виду  $P/(pfV_0) = const$ , получим число Била, которое справедливо для двигателей Стирлинга как свободнопоршневых, так и для двигателей с различным механизмом передачи движения [1].

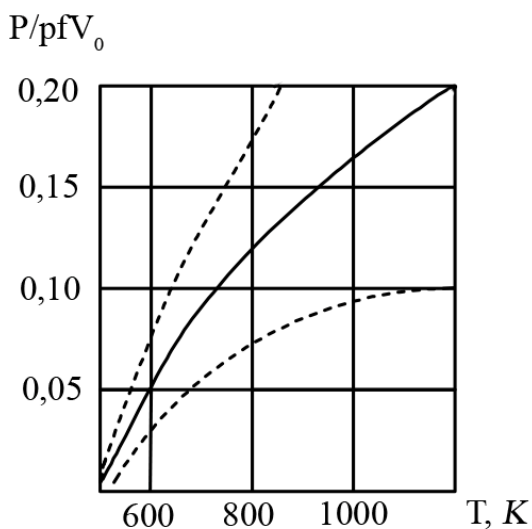


Рис. 2. Зависимость числа Била от температуры нагревателя

В большинстве случаев температурные уровни нагревателя и холодильника двигателя Стирлинга составляют соответственно 500-700 °С и 50-70 °С, и число Била будет являться функцией этих двух температур [1]. Эта зависимость может меняться в достаточно широких пределах, ограниченных на рис. 2 двумя штриховыми линиями. Для

двигателей с высоким КПД и низкой температурой холодильника числа Била расположены вблизи верхней кривой, для двигателей со средним КПД и высокой температурой холодильника – вблизи нижней. Область применения данной зависимости ограничена, но она позволяет проводить оценочные расчеты для вновь разрабатываемых машин и быть полезной для начинающих работать в этой области. Если рассмотреть варианты переделки небольших двигателей ДВС в двигатели Стирлинга мощностью несколько киловатт, где в качестве рабочего тела используется воздух при низком давлении и нагреве в обычной печи, то число Била может быть критерием оценки в данном варианте. Рассмат-

ривая двухцилиндровый двигатель ДВС, переделанный в двигатель Стирлинга при помощи нагревателей, регенератора и холодильника с диаметром и ходом поршня 50 мм, средним давлением рабочего тела в двигателе 0,3 МПа и частоте вращения 1500 об/мин, получаем:

$$P = 0,15 \cdot p \cdot f \cdot V_0 = 0,15 \cdot 0,3 \cdot (1500 / 60) \cdot (\pi / 4) \cdot 5^2 \cdot 5 = 110 \text{ Вт} .$$

Вполне вероятно, что мощность механического трения в данном варианте будет превышать эффективную мощность двигателя. Аналогичное приближенное выражение можно использовать и для эффективного КПД двигателя. Вследствие постоянного усовершенствования конструкций и снижения производственных затрат необходимо осторожно подходить к оценке эффективности двигателей. Если принять значение эффективного КПД на уровне 40-50 % термического КПД цикла Карно [1], то эффективный КПД двигателя может быть выражен как:

$$\eta_e = \frac{\text{эффективная мощность}}{\text{подводимая теплота}} = 0,5 \cdot (T_{\max} - T_{\min}) / T_{\max} . \quad (2)$$

В обычных двигателях используется конструкционная сталь, способная выдерживать температуру в 600 °С и водяное охлаждение (20 °С). Рассматривая данный случай, получим:

$$\eta_e = 0,5 \cdot (873 - 293) / 873 = 33\% .$$

Рассмотренные приближенные методы расчета эффективных значений мощности и КПД пригодны для предварительной оценки, но, тем не менее, они позволяют получить ориентировочное представление об основных параметрах двигателя и могут быть полезны для обсуждения новых конструкций и для начинающих работать в этой области.

#### *Библиографический список*

1. Уокер Г. Двигатели Стирлинга. М.: Машиностроение, 1985. 408 с.
2. Кириллов Н.Г. Производство машин Стирлинга – новое перспективное направление в развитии отечественного машиностроения // Вестник машиностроения. 2005. № 8. С. 3-8.
3. Что такое «машин Стирлинга»? [Электронный ресурс] URL: [http://www.stirling.ru/stirling\\_rus.html](http://www.stirling.ru/stirling_rus.html)

## **АМОРФНЫЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СПЛАВЫ**

*Лопатин А.С., Лопатин И.С., Пирумян Н.М.  
УрФУ, sarapulovfn@yandex.ru*

Энергоэффективность, экологичность, экономичность – тренды современной электроэнергетики. Среди мероприятий, обеспечивающих решение поставленной задачи, важное место занимает энергосбережение на базе применения материалов нового поколения [3].

К таким материалам следует отнести сплавы, не имеющие кристаллического строения и названные аморфными. В обычных металлах атомы упакованы в кристаллических решётках подобно апельсинам в ящике. В аморфных твердых телах атомы существуют в некотором беспорядке, рис. 1.