

# Машины и Установки проектирование, разработка и эксплуатация

Сетевое издание  
МОО «Стратегия объединения»  
<http://maplants-journal.ru>

Ссылка на статью:  
//Машины и установки: проектирование,  
разработка и эксплуатация.  
МОО «Стратегия объединения»  
Электрон. журн. 2023. № 3. С. 39 – 44.

DOI:

Представлена в редакцию: 09.08.2023  
Принята к публикации: 18.08.2023

© МОО «Стратегия объединения»

УДК 62-84

## Двигатели Стирлинга<sup>1</sup>

Степанов Г.Ю.

Москва, Россия

В статье в кратком изложении даны основные сведения о принципе действия, конструктивных схемах и термодинамических циклах двигателя Стирлинга. Рассмотрены достоинства и недостатки. Показаны преимущественные сферы применения. Статья полезна преподавателям и студентам технических ВУЗов.

**Ключевые слова:** двигатель Стирлинга, нагреватель, охладитель, регенератор, вытеснитель, термодинамический цикл.

Двигатели Стирлинга – поршневые тепловые двигатели внешнего сгорания с замкнутым регенеративным циклом.

Принцип действия двигателей Стирлинга весьма прост, и неудивительно, что такой двигатель был изобретен еще в 1816 г., задолго до двигателей внутреннего сгорания.

Пусть в цилиндре поршневого двигателя при сжатии газ охлаждаются, а при расширении нагревают, как показано на рис. 1.

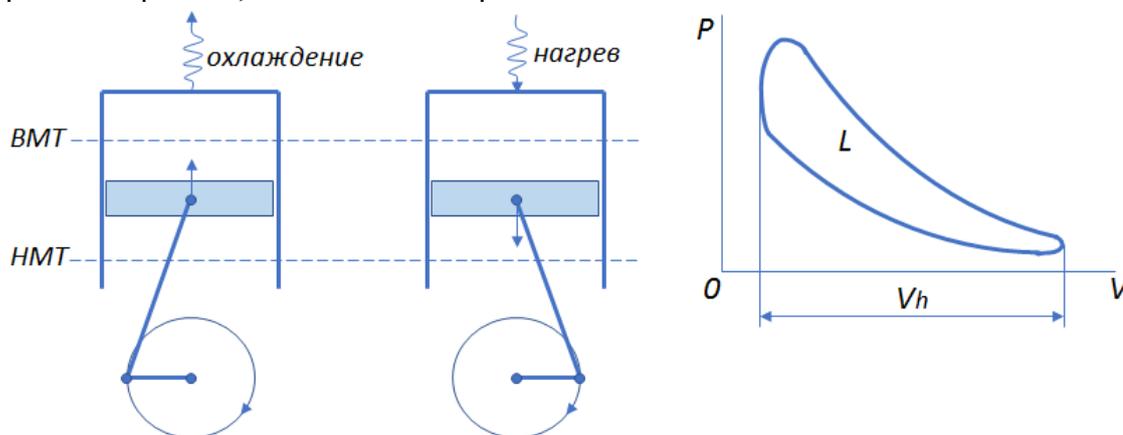
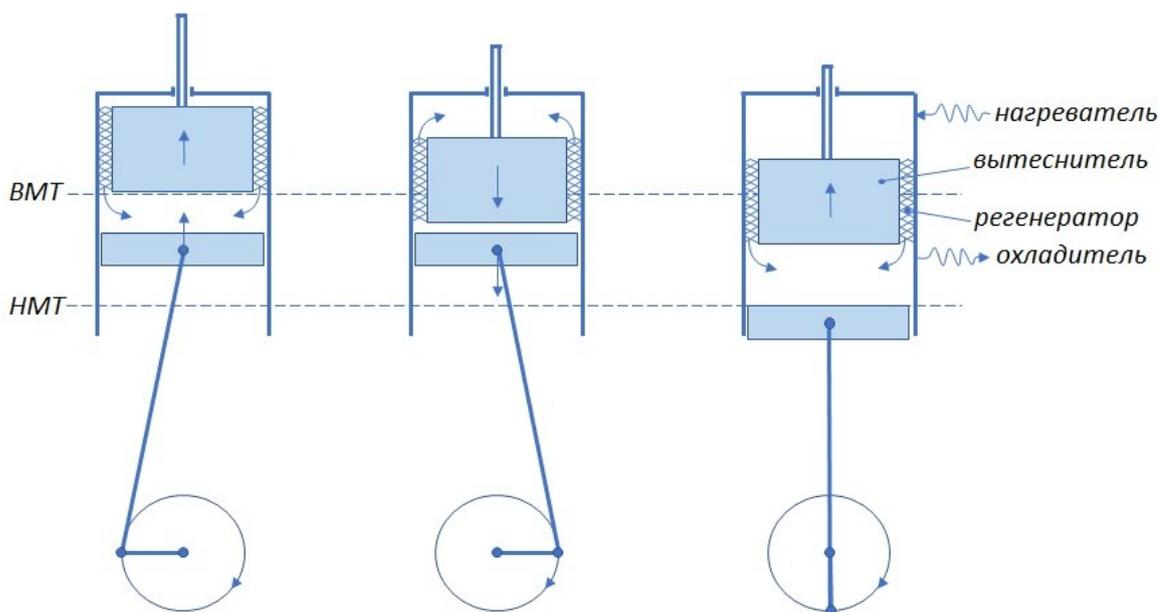


Рис. 1. Принцип действия и термодинамический цикл двигателя Стирлинга.

<sup>1</sup> Согласие на публикацию рукописи статьи дано ее правообладателем и автором книги «Об ученом «танкисте-астронавте» из династии Степановых. Сборник очерков и Воспоминаний» / Авторы-составители: М.М. Буренков, В.В. Соломай, Н.И. Троицкий – М.: МЕГАЛИОН, 2017. – 320 с.

Согласно закону Шарля (1787 г.) при равном объеме нагреваемый газ имеет давление больше, чем охлаждаемый, поэтому газ в цикле производит полезную работу  $L$ . Эта работа тем больше, чем больше отношение указанных давлений и чем больше среднее давление в цилиндре. Двигатель по схеме рис. 1 очевидно не пригоден из-за значительных времен нагрева и охлаждения цилиндра. В реальных двигателях Стирлинга нагрев и охлаждение газа производят в определенных местах цилиндра или в специальных теплообменниках. Согласно патенту Стирлинга двигатель снабжают дополнительным поршнем-вытеснителем, установленным в цилиндре с зазором, так что давления с двух его сторон практически одинаковы и перемещение вытеснителя происходит свободно. В схеме двигателя, изображенной на рис. 2, нагревают верхнюю и охлаждают нижнюю части цилиндра, оребренные снаружи и внутри (что на схеме не показано). При сжатии газа вытеснитель находится в верхней части цилиндра, и большая часть газа охлаждается. При расширении газа вытеснитель движется за поршнем, и оно происходит в верхней горячей части цилиндра. В конце расширения вытеснитель возвращается в верхнюю часть цилиндра. Движения поршня и вытеснителя осуществляются специальными механизмами так, чтобы получить возможно большую работу  $L$ .

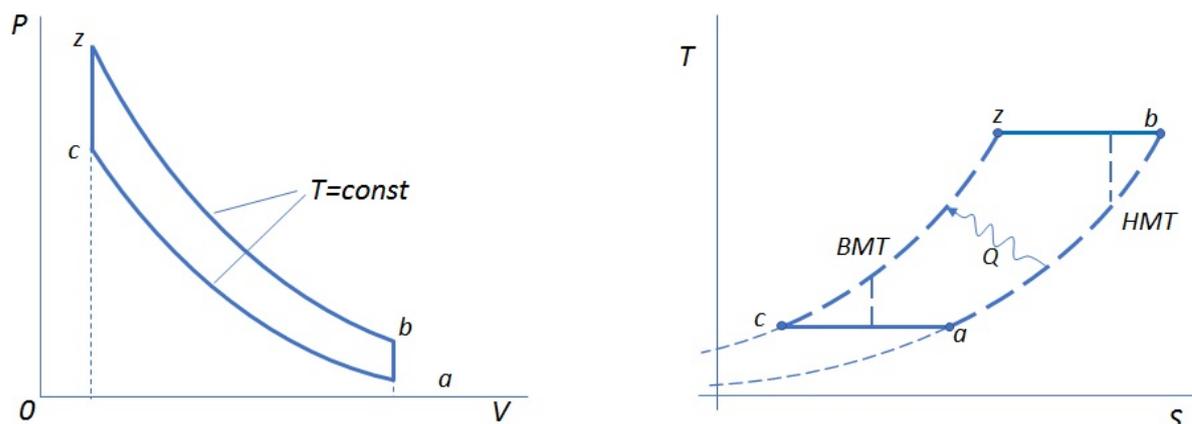


**Рис. 2.** Схема работы двигателя Стирлинга с вытеснителем и регенератором.

Расчетный цикл двигателя Стирлинга, изображенный на рис. 3, состоит из двух изотерм ( $ac$ ,  $zb$ ) и двух изохор ( $cz$ ,  $ba$ ). Изотермические сжатие и расширение предполагают достаточно медленное протекание этих процессов, а нагрев и охлаждение по изохорам — остановку поршня в ВМТ и НМТ.

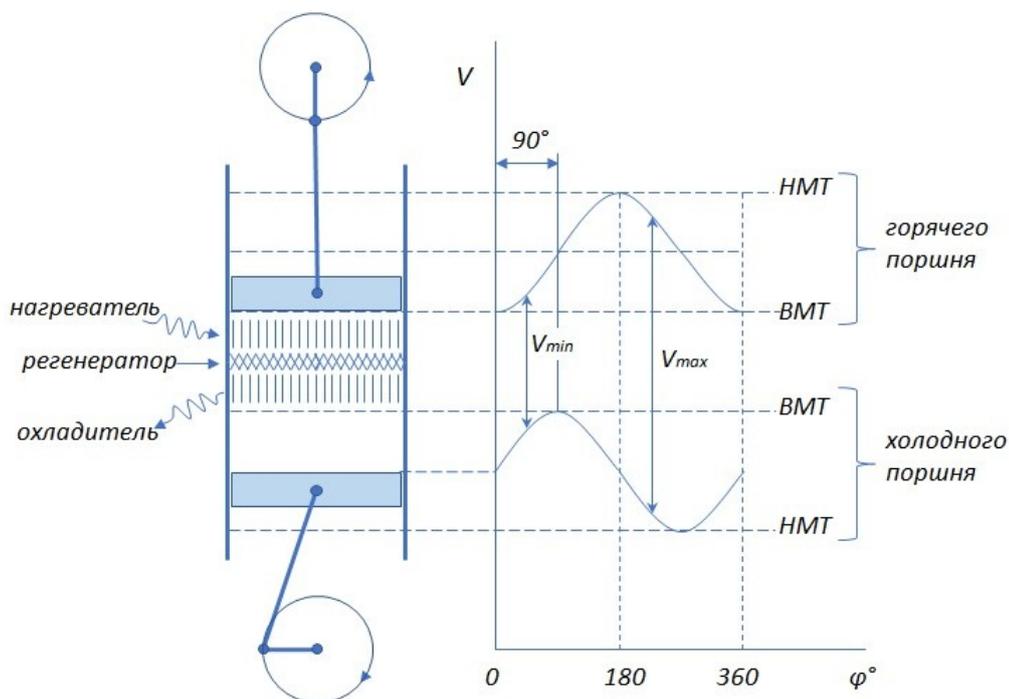
В целях повышения экономичности двигатели Стирлинга снабжают регенераторами — «экономайзерами». По схеме, показанной на рис. 2, регенератор, состоящий из нескольких слоев металлической сетки, установлен на вытеснителе. При его движении вверх регенератор нагревается газом, перетекающим сверху вниз; при движении вытеснителя вниз регенератор отдает запасенное тепло охлажденному газу, перетекающему в противоположном направлении. В диаграммах  $p$ - $V$  и  $T$ - $S$  (рис. 3) это соответствует передаче тепла от изохоры  $ba$  к изохоре  $cz$ ; при теоретически максимальной степени регенерации  $\sigma = 1$  КПД расчетного цикла будет равен КПД цикла Карно между  $T_z = T_b = T_{\max}$  и  $T_a = T_c = T_{\min}$ . Для быстроходных двигателей Стирлинга расчетные процессы сжатия и расширения принимают начинающимися по изотермам и заканчивающимися по адиабатам

(пунктирные прямые на T-S диаграмме рис. 3). Работа такого цикла меньше, чем исходного, но КПД без регенерации приближается к КПД цикла Карно.



**Рис. 3.** Термодинамические циклы двигателя Стирлинга с вытеснителем и регенератором.

Схемы двигателей Стирлинга весьма разнообразны. Отметим еще схему Шмидта (рис. 4) с двумя поршнями в одном цилиндре, кинематически напоминающую известную схему двухтактных дизелей фирмы «Юнкерс» и танкового двигателя 5ТД. Нагреватель, регенератор и охладитель расположены последовательно в цилиндре между ВМТ поршней. Они движутся со сдвигом фаз примерно на  $90^\circ$ , как показано на рис. 4. Благодаря этому сдвигу газ в цилиндре не только сжимается, но и переносится вдоль цилиндра. Сжатие газа происходит преимущественно в холодной части цилиндра, расширение – в горячей части, и поэтому работа расширения превосходит работу сжатия. Регенератор служит для уменьшения потерь тепла при перетекании газа от нагревателя к охладителю. Газ, проходящий через нагреватель в сторону охладителя, отдает часть тепла регенератору, который возвращает ее газу при обратном перетекании.



**Рис. 4.** Схема двигателя Стирлинга с двумя поршнями в одном цилиндре (схема Шмидта).

В отличие от обычных двигателей внутреннего сгорания для двигателей Стирлинга характерны:

- инертные рабочие тела (преимущественно водород или гелий, обладающие большими, чем у воздуха, теплоемкостью, соответственно в 14 и 5 раз, и теплопроводностью в 7 и 6 раз; гелий предпочтительнее водорода, который при высоких температурах активно диффундирует сквозь металлы);

- высокие средние и максимальные давления газа в цилиндре (до 100-200 бар), необходимые для получения достаточной удельной работы  $L/G$ , кДж/кг;

- низкие максимальные температуры газа в цилиндре (до 800-900<sup>0</sup>С), ограниченные жаростойкостью нагревателя и условиями теплопередачи;

- практически герметичные цилиндры за счет специальных уплотнений типа пластмассовых сальников или «чулка», и соответственно отсутствие в цилиндрах посторонних примесей;

- малые отношения хода  $S$  поршня к диаметру  $D$  цилиндра ( $S/D \approx 0,5$ );

- «всеядность», возможность работы на любом топливе и от любых источников тепла;

- отсутствие в подавляющем большинстве схем клапанов и других органов газораспределения;

- малошумность;

- высокая надежность, малые износы поршней и цилиндров;

- возможность быстрого перевода двигателя в режим торможения с его превращением в эффективный тепловой насос (нагреватель или холодильник).

Двигатели Стирлинга имеют многочисленные области применения.

Первые маломощные двигатели использовали в начале 20-го века для привода насоса церковного органа и генератора питания радиоприемников голландской фирмы «Филлипс». В настоящее время миниатюрные двигатели Стирлинга с нагревателем от радиоизотопов применяют для медицинских стимуляторов.

Двигатели Стирлинга использовали в качестве судовых с охлаждением забортной водой и предлагают для подводных лодок и торпед. Под водой (и под землей) можно обеспечить отсутствие выпуска газообразных продуктов сгорания в кислороде углеводородных топлив путем конденсации паров воды и химического абсорбирования углекислого газа; при использовании тепла сгорания металлов непосредственно образуются твердые окислы.

Двигатели Стирлинга считают перспективными и разрабатывают для космических аппаратов и станций; нагрев происходит от солнечного рефлектора, охлаждение радиационное в его тени. По сравнению с паровыми и замкнутыми газотурбинными двигателями, космические двигатели Стирлинга оказываются несколько более легкими и надежными.

В применении к наземному транспорту экономические и массогабаритные показатели двигателей Стирлинга близки к показателям дизелей, имея некоторые преимущества в надежности, всеядности, малошумности и экологичности. Интересно предложение использовать для нагрева тепловой аккумулятор с легкоплавкими металлами или солями (например LiF с температурой и теплотой плавления 850<sup>0</sup>С и 900 кДж/кг). В режиме торможения тепло не рассеивается, а возвращается в аккумулятор.

Однако основные автомобильные фирмы в результате многолетних опытно-конструкторских исследований все же отдают предпочтение электрическим двигателям.

Недостатками двигателей Стирлинга считают сложность устройства и расчета, большое время изменения нагрузки, отсутствие решающих преимуществ в показателях и, главное, ясных перспектив их повышения. С другой стороны, множество возможных

кинематических и конструктивных вариантов этих двигателей рассматривают как еще неисчерпанный источник их совершенствования и оптимизации. Известны, например, двигатели с жидким поршнем в сочетании с гидравлическим мотором или компрессором; свободнопоршневые двигатели; комбинированные двигатели с газотурбинным циклом нагрева и охлаждения. Использование новых материалов и технологий, новых элементов конструкции, в частности, тепловых трубок для нагрева и охлаждения, продолжают привлекать изобретателей и исследователей к двигателям Стирлинга.

---

### Список литературы

1. Г.Уокер. Двигатели Стирлинга. Пер. с англ.– М.: Машиностроение, 1985. – 408 с. Сокр. Пер. с англ. Б.В. Сутугина и Н.В. Сутугина (Walker G. Stirling Engines / Clarendon Press, Oxford, 1980.).
  2. Г.Ридер, Ч.Хупер. Двигатели Стирлинга. Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 464 с.
- 

### АВТОР

**Степанов Георгий Юрьевич** (01.08.1922 – 15.10.2005), доктор физико-математических наук, профессор, Заслуженный деятель науки и техники РСФСР, почетный член Российской академии естественных наук (РАЕН), действительный член Международной Астронавтической академии, главный научный сотрудник НИИ механики МГУ.

# Machines & Plants Design & Exploiting

*Electronic journal  
International Public Organization  
“Integration strategy”  
<http://maplants-journal.ru>*

*//Machines and Plants:Design and Exploiting.  
2023. № 3. pp. 39 – 44.*

DOI:

Received: 09.08.2023

Accepted for publication: 18.08.2023

© International Public Organization “Integration strategy”

## Stirling Engines <sup>2</sup>

**Georgy U. Stepanov**

Moscow, Russian Federation

---

The article briefly provides basic information about the principle of operation, design schemes and thermodynamic cycles of the Stirling engine. Advantages and disadvantages are considered. The predominant areas of application are shown. The article is useful for teachers and students of technical universities.

---

**Keywords:** Stirling engine, heater, cooler, regenerator, displacer, thermodynamic cycle.

---

### References

1. Walker G. Stirling Engines. Translated from English. – M.: Mechanical engineering, 1985. – 408 p.
  2. Reader G., Hooper C. Stirling engines. Translated from English. – M.: Mir, 1986. – 464 p.
- 

### AUTHOR

**Stepanov Georgy Yuryevich** (01.08.1922 – 15.10.2005), Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Honored Worker of Science and Technology of the RSFSR, honorary member of the Russian Academy of Natural Sciences (RAS), full member of the International Astronautical Academy, chief Researcher of the Institute of Mechanics of Moscow State University.

---

<sup>2</sup> Consent to the publication of the manuscript of the article was given by the copyright holder and the author of the book "About the scientist "tank-cosmonaut" from the Stepanov dynasty. Collection of essays and memoirs" / Authors-compilers: [M.M. Burenkov](#), V.V. Solomai, [N.I. Troitsky](#). – M.: MEGALION, 2017. – 320 p.