

УДК 621.1

DOI: 10.15393/j2.art.2019.4382

*Статья*

## **Кинематическая параметризация кривошипно-ползунной группы Альфа-Стирлинга**

**Евгений А. Тихонов<sup>1,\*</sup>**

<sup>1</sup> Петрозаводский государственный университет, Россия, г. Петрозаводск, пр. Ленина, д. 33;  
E-Mail: [tihonov@psu.karelia.ru](mailto:tihonov@psu.karelia.ru) (Е. Т.)

\* Автор, с которым следует вести переписку; E-Mail: [tihonov@psu.karelia.ru](mailto:tihonov@psu.karelia.ru) (Е. Т.);  
Tel.: +7(911)4089656.

*Получена: 4 января 2019 / Принята: 26 марта 2019 / Опубликовано: 4 апреля 2019*

---

**Аннотация:** В данной статье рассматривается кинематическая параметризация кривошипно-ползунной группы двигателя Стирлинга типа «Альфа». Получены зависимости перемещений поршня и вытеснителя при одинаковых шатунах и угле между осями цилиндров  $90^\circ$ . Полученное уравнение перемещения поршня от перемещения вытеснителя не имеет в своём составе угла поворота коленчатого вала, что позволит получить численную модель без моделирования кривошипа и шатунов, а это значительно снизит ресурсоёмкость численных расчётов.

**Ключевые слова:** Альфа-Стирлинг, численное моделирование, перемещение поршней, кинематическая параметризация.

---

DOI: 10.15393/j2.art.2019.4382

*Article*

## **Kinematic parameterization of Alfa-Stirling crank mechanism**

**Evgeny Tihonov<sup>1,\*</sup>**

<sup>1</sup> Petrosavodsk state university, Russia, Petrozavodsk, Leninf st., 33; E-Mail: [tihonov@psu.karelia.ru](mailto:tihonov@psu.karelia.ru) (E. T.)

\* Author to whom correspondence should be addressed; E-Mail: [tihonov@psu.karelia.ru](mailto:tihonov@psu.karelia.ru) (E. T.); Tel.: +7(911)4089656.

*Received: 4 January 2019 / Accepted: 26 March / Published: 4 April 2019*

---

**Abstract:** This article considers Alfa-Stirling crank mechanism kinematic parameterization. The obtained equations of a piston and displacer movement with equal connecting rods and with the 90° angle between cylinders axels are presented. The equation of piston movement dependence on the displacer movement does not include the angle of crankshaft rotation. This allows obtaining a numerical model that excludes crank and connecting rods modeling, thus reducing resource intensity of numerical calculations.

**Keywords:** Alfa-Stirling, numerical modeling, pistons movement, kinematic parameterization

---

## 1. Введение

В настоящее время интерес к двигателям внешнего сгорания вновь возрастает. Причин тому несколько. Во-первых, качественное углеводородное топливо не является неистощимым ресурсом на планете. Во-вторых, цена традиционных энергоносителей постоянно растёт, в том числе и из-за истощения доступных запасов. В-третьих, при этом всё с большей актуальностью встаёт вопрос получения электроэнергии.

Особенно этот вопрос актуален для удалённых районов с малоразвитой инфраструктурой, различных экспедиций и исследовательских станций. Сейчас вопрос их энергоснабжения, как правило, решается за счёт дизель-генераторов. Такое решение весьма дорого, как само по себе (1 кВт·час сжигается 0,2 л дизельного топлива [1]), так и его логистическое обеспечение — зачастую очень накладно доставлять топливо в требуемые районы.

При этом в этих отдалённых районах бывает достаточно много других типов энергоресурсов, как правило, твёрдых. Это могут быть уголь, дрова, торф и т. д. Данные виды энергоресурсов отлично подойдут в качестве источника энергии для двигателя, работающего по принципу Стирлинга.

Хотя двигатели Стирлинга известны достаточно давно [2], их разработка и совершенствование строились на базовых основах термодинамики и огромном объёме экспериментальных исследований [3]. Поэтому данные двигатели не смогли выдержать темпы развития обладающих отлично разработанной теоретической базой двигателей внутреннего сгорания.

Теоретическое рассмотрение процессов, протекающих в двигателях Стирлинга, ограничено исследованием отдельных элементов и закономерностей, таких как шаттл-эффект в системе «вытеснительный поршень-цилиндр» [4], тепловые потоки системы «рабочее тело — регенератор» при изменении направления движения газа, влияние «мёртвого объёма» на КПД и удельную мощность [5] и т. д.

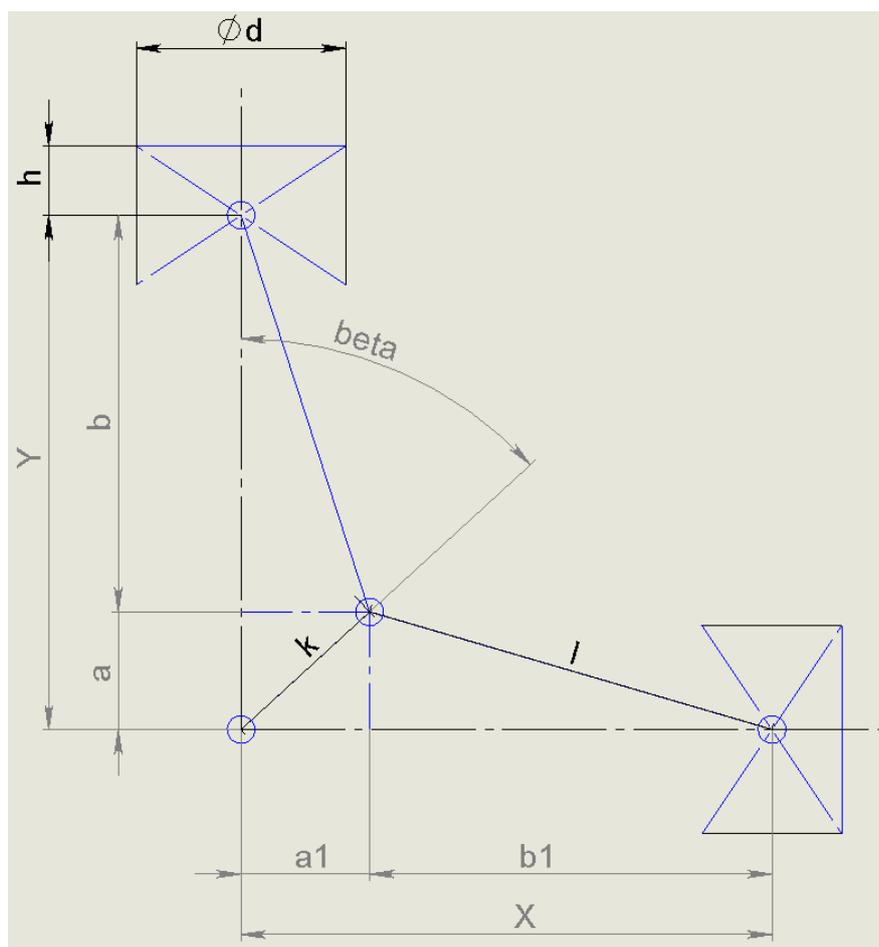
Комплексное же рассмотрение рабочего процесса двигателя Стирлинга и разработка общей теории остаётся нерешённой задачей. Такая задача практически неразрешима аналитическими методами. Для её решения необходимо применять численные методы решения связанных задач [6]. Под связанными задачами понимаются задачи гидродинамики (в т. ч. с фазовыми переходами), теплопередачи, механики деформируемого тела в одной численной модели исследуемого механизма, в так называемой «явной постановке», т. е. позволяющей исследовать быстротекущие процессы [7].

При правильном подходе будет возможно получить оптимальные конструктивные и технологические параметры двигателя Стирлинга и получить максимально эффективную энергетическую машину, реализующую цикл Стирлинга без решения таких фундаментальных задач, как, например, герметизация рабочего тела [8].

## 2. Материалы и методы

Задачей теоретического исследования данной статьи является определение кинематической зависимости положения поршней двигателя Стирлинга типа «Альфа» [9]. Данные зависимости позволят разработать численную протомодель двигателя и исследовать динамику перетекания газов из горячей полости в холодную.

Кинематическая схема двигателя представлена на рисунке.



**Рисунок.** Кинематическая схема двигателя Стирлинга типа «Альфа»

Постановка задачи следующая: перемещение вертикального поршня ( $Y$ ) будет задано гармонической функцией. Так как на данном этапе исследуется исключительно газодинамическая задача, то в моделировании механической части нет необходимости. Это позволит существенно сократить ресурсоёмкость выполнения моделирования. Инерционную составляющую кривошипно-ползунного механизма учтём моментом инерции маховика  $J_m$ . Далее, необходимо вывести зависимость положения горизонтального поршня от положения вертикального  $X(Y)$ , что позволит в дальнейшем исследовать взаимное изменение объёмов горячей и холодной полостей и динамику перетекания газа.

### 3. Результаты

Как видно из рисунка, угол между осями поршней составляет  $90^\circ$ . Данный параметр многими исследователями считается оптимальным для получения максимальной удельной мощности. На данном этапе мы примем данную гипотезу, но в дальнейшем подвергнем её проверке в процессе численного моделирования. Система уравнений координат перемещений вертикального и горизонтального поршней в зависимости от угла поворота коленчатого вала будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} Y = k \cdot \cos \beta + \sqrt{l^2 - (k \cdot \sin \beta)^2} \\ X = k \cdot \sin \beta + \sqrt{l^2 - (k \cdot \cos \beta)^2} \end{cases} \quad (1)$$

Далее, необходимо определить вид уравнения (1). Для этого определим координату горизонтального поршня  $X$  в следующем виде:

$$X = a_1 + b_1 \quad (2)$$

или (см. рисунок)

$$X = \sqrt{k^2 - a^2} + \sqrt{l^2 - a^2} \quad (3)$$

При этом параметр  $a$  будет равен:

$$a = Y - b \quad (4)$$

Таким образом, подставляя (4) в зависимость (3), получаем:

$$X = \sqrt{k^2 - (Y - b)^2} + \sqrt{l^2 - (Y - b)^2} \quad (5)$$

Далее, рассмотрим параметр  $b$ . Данный параметр может быть определён как через разность  $X - a$ , так и через треугольник  $\Delta(l, a, b)$  (см. рисунок). Сведём данные зависимости в систему:

$$\begin{cases} b = Y - a \\ b = \sqrt{l^2 - a_1^2} \end{cases} \quad (6)$$

Как видно из системы, в ней присутствуют параметры  $a$  и  $a_1$ . Учитывая жёсткость треугольника  $\Delta(Ylk)$ , т. к.  $l$  и  $k$  являются константами, отношение параметров  $a$  и  $a_1$  будет отражать угол положения коленчатого вала  $\beta$ . Тогда

$$a_1^2 = k^2 - a^2. \quad (7)$$

Подставляя эту зависимость во второе уравнение системы (6), получим следующее:

$$b = \sqrt{l^2 - (k^2 - a^2)} = \sqrt{l^2 + k^2 + a^2}. \quad (8)$$

Учитывая уравнение (7), получаем:

$$b = \sqrt{l^2 + k^2 + (Y - b)^2} = \sqrt{l^2 + k^2 + Y^2 - 2Yb + b^2}. \quad (9)$$

Возведём полученное уравнение в квадрат:

$$b^2 = l^2 + k^2 + Y^2 - 2Yb + b^2. \quad (10)$$

Выразим  $b$ :

$$\begin{aligned} b^2 + 2Yb - b^2 &= l^2 + k^2 + Y^2 \\ 2Yb &= l^2 + k^2 + Y^2 \end{aligned} \quad (11)$$

$$b = \frac{l^2 + k^2 + Y^2}{2Y}$$

Подставим полученное выражение в уравнение (5):

$$X = \sqrt{k^2 - \left(Y - \frac{l^2 + k^2 + Y^2}{2Y}\right)^2} + \sqrt{l^2 - \left(Y - \frac{l^2 + k^2 + Y^2}{2Y}\right)^2}. \quad (12)$$

Рассмотрим вычитаемое подкоренной разности. Упростим его:

$$Y - \frac{l^2 + k^2 + Y^2}{2Y} = Y - \left(\frac{l^2 + k^2}{2Y} + \frac{Y^2}{2Y}\right) = Y - \frac{l^2 + k^2}{2Y} - \frac{Y}{2} = \frac{Y}{2} - \frac{l^2 + k^2}{2Y}. \quad (13)$$

Окончательно имеем вид уравнения, описывающего взаимосвязь координаты горизонтального поршня относительно координаты вертикального:

$$X(Y) = \sqrt{k^2 - \left(\frac{Y}{2} - \frac{l^2 + k^2}{2Y}\right)^2} + \sqrt{l^2 - \left(\frac{Y}{2} - \frac{l^2 + k^2}{2Y}\right)^2}. \quad (14)$$

#### 4. Обсуждение и заключение

Полученное уравнение позволит достаточно просто смоделировать циклическое перетекание газа из горячей полости в холодную. Далее, увеличивая частоту вращения коленчатого вала, можно будет исследовать возрастание аэродинамического сопротивления газа в рабочем объёме. Отсутствие в итоговом уравнении угла поворота коленчатого вала позволит упростить численную модель системы и снизить ресурсоёмкость выполнения расчёта.

В данном моделировании приняты определённые упрощения, например, одинаковые длины шатунов  $l$  (см. рисунок). В дальнейшем система будет приведена к общему виду, который позволит учитывать и изменять большинство параметров.

#### Список литературы

1. Расход дизельного генератора // <http://machineries.ru/>. — URL: [http://machineries.ru/a\\_19.html](http://machineries.ru/a_19.html). — (06.12.2018).
2. Шалай, В. В. Двигатель внешнего сгорания / В. В. Шалай, Ю. П. Макушев // Омский научный вестник. — 2008. — № 3. — С. 65—71.
3. Корнеев, С. А. Двигатель Стирлинга (история, настоящее и перспектива) / С. А. Корнеев // Проблемы машиностроения и автоматизации. — 2011. — № 2. — С. 132—135.
4. Савченко, В. А. Об интенсификации теплого потока в систему охлаждения от деталей цилиндра-поршневой группы двигателя Стирлинга вследствие шаттл-эффекта / В. А. Савченко, С. П. Столяров // Труды Санкт-Петербургского государственного морского университета. — 2014. — № 1. — С. 31—37.

5. *Лукачев, С. В.* Термомеханические преобразователи с сильфонными рабочими полостями / С. В. Лукачев, А. И. Довгялло, В. Н. Белозерцев // Проблемы и перспективы развития двигателестроения. — 1998. — № 1. — С. 127—139.
6. *Бояршинов, М. Г.* Разработка методики замены натуральных испытаний численным моделированием динамических характеристик двигателя / М. Г. Бояршинов, А. А. Скутин // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. — 2015. — № 1. — С. 5—22.
7. *Бабкин, А. В.* Численные методы в задачах физики быстропротекающих процессов / А. В. Бабкин, В. И. Колпаков, В. Н. Охитин. — Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. — 516 с.
8. Патент 2372258 Рос. Федерация, В 64 G 1 50, F 25 В 45 00. Устройство герметизации ёмкости с рабочим телом и способ его изготовления / Н. А. Тестоедов, В. Е. Косенко, В. А. Бартнев ; заявитель и патентообладатель ООО «Информационные спутниковые системы». — № 2008125364/11 ; заявл. 23.06.2008 ; опубл. 20.08.2009, Бюл. № 23 (II ч.). — 3 с.
9. *Куликов, Е. Е.* Термодинамическая модель работы двигателя Стирлинга Альфа-схемы / Е. Е. Куликов // Тринадцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных : в 6 т. : сб. тр. научно-практич. конф. — Иваново : ИГЭУ им. В. И. Ленина, 2018. — С. 3—126.

## References

1. Raskhod dizel'nogo generatora // <http://machineries.ru/>. — URL: [http://machineries.ru/a\\_19.html](http://machineries.ru/a_19.html). — (06.12.2018).
2. *SHalaj, V. V.* Dvigatel' vneshnego sgoraniya / V. V. SHalaj, YU. P. Makushev // Omskij nauchnyj vestnik. — 2008. — № 3. — S. 65—71.
3. *Korneev, S. A.* Dvigatel' Stirlinga (istoriya, nastoyashchee i perspektiva) / S. A. Korneev // Problemy mashinostroeniya i avtomatizacii. — 2011. — № 2. — S. 132—135.
4. *Savchenko, V. A.* Ob intensivizacii teplogo potoka v sistemu ohlazhdeniya ot detalej cilindroporshnevoj gruppy dvigatelya stirlinga vsledstvie shattl-ehffekta / V. A. Savchenko, S. P. Stolyarov // Trudy Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo morskogo universiteta. — 2014. — № 1. — S. 31—37.
5. *Lukachev, S. V.* Termomekhanicheskie preobrazovateli s sil'fonnymi rabochimi polostyami / S. V. Lukachev, A. I. Dovgyallo, V. N. Belozercev // Problemy i perspektivy razvitiya dvigatelestroeniya. — 1998. — № 1. — S. 127—139.
6. *Boyarshinov, M. G.* Razrabotka metodiki zameny naturnyh ispytaniy chislennym modelirovaniem dinamicheskikh harakteristik dvigatelya / M. G. Boyarshinov, A. A. Skutin // Transport. Transportnye sooruzheniya. EHkologiya. — 2015. — № 1. — S. 5—22.
7. *Babkin, A. V.* CHislennye metody v zadachah fizika bystroprotekeyushchih processov / A. V. Babkin, V. I. Kolpakov, V. N. Ohitin. — Moskva : MGTU im. N. EH. Baumana, 2000. — 516 s.
8. Патент 2372258 Рос. Федерациya, В 64 G 1 50, F 25 В 45 00. Ustrojstvo germetizacii emkosti s rabochim telom i sposob ego izgotovleniya / N. A. Testoedov, V. E. Kosenko, V. A. Bartnev ; zayavitel' i patentoobladatel' ООО «Informacionnye sputnikovye sistemy». — № 2008125364/11 ; zayavl. 23.06.2008 ; opubl. 20.08.2009, Byul. № 23 (II ch.). — 3 s.
9. *Kulikov, E. E.* Termodinamicheskaya model' raboty dvigatelya stirlinga al'fa-skhemy / E. E. Kulikov // Trinadcataya mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya

studentov, aspirantov i molodyh uchenyh : v 6 t. : sb. tr. nauchno-praktich. konf. — Ivanovo : IGEHU im. V. I. Lenina, 2018. — S. 3—126.

© Тихонов Е. А., 2019