

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ РОТОРНО-ПОРШНЕВОЙ СХЕМЫ РЕАЛИЗАЦИЕЙ ДИЗЕЛЬНОГО ЦИКЛА

© 2016

- В. В. Окорочков** начальник отдела поршневых двигателей, СКБ ПАО «Кузнецов», г. Самара, [vv\\_okor@mail.ru](mailto:vv_okor@mail.ru)
- В. М. Окорочкова** кандидат технических наук, доцент кафедры теории двигателей летательных аппаратов, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, [nauka@ssau.ru](mailto:nauka@ssau.ru)
- А. И. Раводин** инженер, СКБ ПАО «Кузнецов», г. Самара, [DamnedSoulangel@list.ru](mailto:DamnedSoulangel@list.ru)

Рассмотрены вопросы повышения эффективности поршневых роторных двигателей путём реализации экономичного дизельного цикла в модуле с трёхдуговой эпитрохой и кинематической схемой с внешним зацеплением. Необходимость дизельного цикла вызвана потребностью снижения удельного расхода топлива двигателями роторно-поршневой схемы, которые получают в настоящее время широкое применение в легкомоторной авиации, прежде всего для дистанционно пилотируемых летательных аппаратов. Роторно-поршневой двигатель с двухдуговой эпитрохой по схеме Ванкеля, отличаясь от традиционных поршневых двигателей рядом преимуществ, уступает им по экономичности, особенно на частичных режимах. Реализация дизельного цикла в циклоидальном поршневом двигателе с трёхдуговой эпитрохой позволяет с сохранением перечисленных положительных качеств снизить удельные расходы топлива на 30%, а также использовать дизельное топливо, которое предпочтительней для высотных летательных аппаратов ввиду меньшей склонности к газообразованию в трубопроводах. Внутренний контур статора двигателя образован тремя дугами эпитрохи, образующими три рабочие камеры, равномерно расположенные по периметру, что обеспечивает уменьшение тепловой деформации статора при работе двигателя. Разработана методика определения геометрических параметров роторно-поршневого двигателя по схеме с трёхдуговой эпитрохой и конструкторская проработка в программе КОМПАС-3D дизельного двигателя мощностью 50 л.с. для применения в легкомоторной авиации и в качестве привода электрогенераторов, насосов, компрессоров при наземном применении.

*Роторно-поршневые двигатели; модуль; ротор; статор; системы охлаждения и зажигания; легкомоторная авиация; дистанционно пилотируемые летательные аппараты; генератор; компрессор.*

---

**Цитирование:** Окорочков В.В., Окорочкова В.М., Раводин А.И. Повышение эффективности двигателей роторно-поршневой схемы реализацией дизельного цикла // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15, № 4. С. 243-251. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-4-243-251

В настоящее время роторно-поршневые двигатели (РПД) получили широкое распространение в области малой авиации и, особенно, для дистанционно пилотируемых летательных аппаратов (ДПЛА) ввиду значительных преимуществ по удельным массогабаритным параметрам [1]. Но РПД несколько уступают поршневым двигателям (ПД) традиционной схемы по топливной экономичности, особенно на частичных режимах работы двигателя. С увеличением продолжительности полёта современных ДПЛА до нескольких суток этот фактор приобретает особо важное значение.

Известно, что работающие по дизельному циклу ПД экономичнее бензиновых на 25%. Поэтому эффективность двигателей роторно-поршневой схемы может быть увеличена реализацией дизельного цикла и работой на тяжёлых топливах. Применяемая в настоящее время схема РПД Ванкеля с двухдуговой эпитрохой не может обеспечить степень сжатия более 12, что недостаточно для реализации дизельного цикла. Это вынуждает обратиться к схеме циклоидального поршневого двигателя с трёхдуговой эпитрохой, обеспечивающей большую степень сжатия. Для формирования внутрен-

ней поверхности статора обеих схем используется эпитрохоида, математическое выражение которой известно [2]. Этим обусловлено применение некоторых общих формул для определения основных геометрических параметров.

В отличие от широко известной схемы РПД Ванкеля на базе двухдуговой эпитрохоиды, теория которой разработана и опубликована в Германии, Японии и России [2], отечественная методика по расчёту двигателей по циклоидальной схеме с внешней огибающей семейства эпитрохоид отсутствует. Схема циклоидального поршневого двигателя (ЦПД) конструктивно отличается от схемы РПД не только формой эпитрохоиды статора и ротора, но и кинематикой синхронизирующих шестерён. В ЦПД подвижной шестернёй, закреплённой на роторе, является малая шестерня с радиусом  $r = 2e$ , а неподвижная шестерня – большая с радиусом  $R = 3e$  (рис. 1).

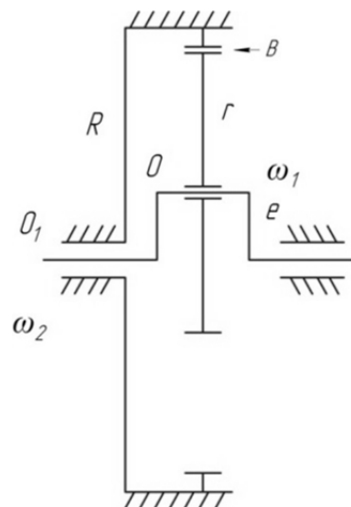


Рис. 1. Кинематическая схема синхронизирующих шестерён

Скорость точки  $B$  подвижной шестерни, закреплённой на роторе, складывается из окружной скорости  $\omega_1$  вращения малой шестерни вокруг центра  $O$ , равной  $\omega_1 r$ , и скорости вращения вокруг точки  $O_1$  (оси вала), равной  $\omega_2 e$ . Поскольку точка  $B$  неподвижна, т.к. контактирует с неподвижной большой шестерней, то

$$\omega_1 r - \omega_2 e = 0;$$

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{e}{r} = \frac{1}{2}, \quad 2\omega_1 = \omega_2.$$

Скорость вращения вала вдвое выше скорости вращения ротора. Вал и ротор вращаются в противоположные стороны.

Для проектирования ЦПД необходима разработка методики определения геометрических параметров ротора и статора, величины рабочего объёма циклоидального двигателя на базе трёхдуговой эпитрохоиды, зависимости изменения рабочего объёма камеры ЦПД от угла поворота ротора, а также определение необходимого объёма камеры сгорания для достижения требуемой степени сжатия в зависимости от заданной мощности. Профиль статора ЦПД образован тремя идентичными дугами эпитрохоиды, повернутыми друг относительно друга на угол  $120^\circ$ . Профиль ротора образован двухдуговой эпитрохоидой.

На рис. 2-4 представлены схемы для определения расчётных зависимостей координат статора и ротора, на которых ротор повернут на некоторый угол (рис. 2) и в положениях максимального (рис. 3) и минимального (рис. 4) объёмов верхней рабочей камеры.

**Определение геометрии статора.** В представленных на рис. 2 координатах  $XOY$  профиль дуги 1 контура статора в параметрическом виде описывается следующим образом:

$$\begin{aligned} x_{стам,1}(t) &= e \sin 3t + R_1 \sin t; \\ y_{стам,1}(t) &= e \cos 3t + R_1 \cos t, \end{aligned} \tag{1}$$

где  $t$  – параметр функции, изменяющийся от  $-\frac{\pi}{3}$  до  $\frac{\pi}{3}$ ;  $e$  – эксцентриситет;  $R_1$  – производящий радиус статора.

Для определения координат дуг 2 и 3 (рис. 2) подставим формулы (1) в выражение для поворота координат с центром поворота в точке  $(0; -e)$ . После преобразования тригонометрических функций получим следующую параметрическую функцию:

$$\begin{aligned} x_{стат}(t, \theta) &= e \sin(3t + \theta) + R_1 \sin(t + \theta) + e \sin \theta; \\ y_{стат}(t, \theta) &= e \cos(3t + \theta) + R_1 \cos(t + \theta) - e(1 - \cos \theta), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\theta$  – угол поворота ветви. Подставляя вместо  $\theta$  значения  $\frac{2\pi}{3}$  и  $\frac{4\pi}{3}$ , получим уравнения координат соответственно второй и третьей ветвей контура статора.

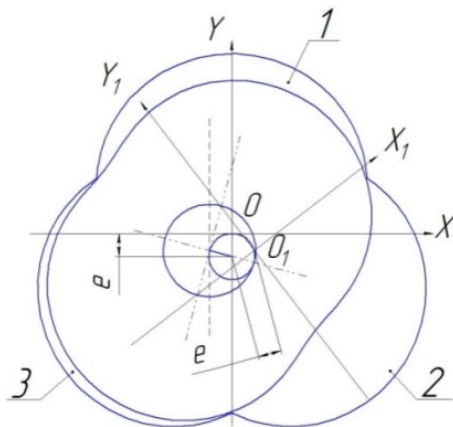


Рис. 2. Положение ротора в начале такта всасывания в рабочей камере 1

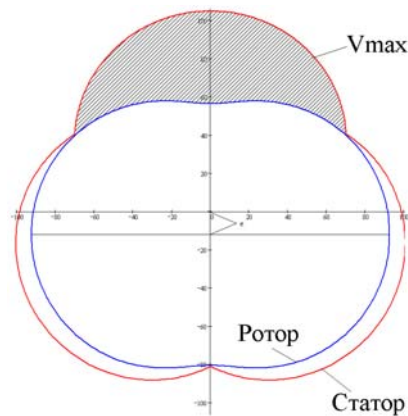


Рис. 3. Положение ротора с максимальным объёмом рабочей камеры

**Определение геометрии ротора.** В представленных на рис. 2 координатах  $X_1O_1Y_1$  профиль дуги ротора описывается следующим образом:

$$\begin{aligned} x_{рот}(t) &= e \sin 3t + R \sin t; \\ y_{рот}(t) &= e \cos 3t + R \cos t, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $t$  – параметр функции, изменяющийся от 0 до  $2\pi$ ,  $e$  – эксцентриситет,  $R$  – производящий радиус ротора.

Полученные зависимости позволяют найти координаты точек контура ротора для использования при моделировании или составлении программы для станка с числовым программным управлением, так как описывают ротор в центральной системе координат с осями симметрии, совпадающими с осями абсцисс и ординат.

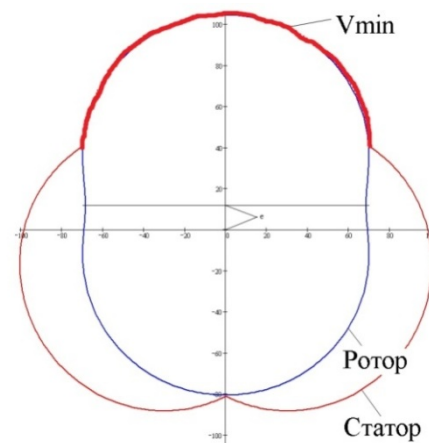


Рис. 4. Положение ротора с минимальным объёмом рабочей камеры

Но для моделирования процессов, происходящих в ЦПД, данного описания недостаточно, так как ротор во время работы двигателя совершает плоскопараллельное движение. Для выполнения расчётов, связанных с определением рабочего объёма камеры и степени сжатия, необходимо иметь универсальное параметрическое описание движущегося ротора.

Так как движения ротора и эксцентрика жёстко синхронизированы зубчатой передачей, то можно применить принцип суперпозиции и разложить плоскопараллельное движение ротора на поворот ротора относительно центра и вращение центра, принадлежащего эксцентрику, в противоположную сторону с вдвое большей угловой скоростью. В таком случае движение центра ротора будет описываться следующими зависимостями:

$$\begin{aligned}x_c(\gamma) &= e \sin(-2\gamma); \\y_c(\gamma) &= e \cos(-2\gamma),\end{aligned}$$

где  $\gamma$  – угол поворота ротора. Знак минус перед аргументом тригонометрических функций показывает, что ротор вращается в сторону, противоположную вращению вала. Учитывая свойства тригонометрических функций, запишем эти зависимости в виде:

$$\begin{aligned}x_c(\gamma) &= -e \sin 2\gamma; \\y_c(\gamma) &= e \cos 2\gamma.\end{aligned}\tag{4}$$

Подставляя полученные зависимости (3) и (4) в выражение для поворота точки в системе координат, получим итоговые выражения, описывающие положение произвольной точки внешнего контура ротора, повернутого на произвольный угол в системе координат  $XOY$ :

$$\begin{aligned}x_{pom}(t, \gamma) &= e \sin(3t + \gamma) + R \sin(t + \gamma) - e \sin 2\gamma; \\y_{pom}(t, \gamma) &= e \cos(3t + \gamma) + R \cos(t + \gamma) - e(1 - \cos 2\gamma).\end{aligned}\tag{5}$$

**Определение зависимости рабочего объёма камеры двигателя от угла поворота ротора.** Рабочий объём одной камеры ЦПД в каждый конкретный момент может быть вычислен как произведение площади поперечного сечения и ширины статора. Так как ширина статора является величиной постоянной, то процесс определения зависимости объёма от угла поворота ротора сводится к определению данной зависимости для площади сечения. Искомая площадь  $S(\gamma)$  получается вычитанием из площади  $S_{стат}$ , ограниченной контуром дуги статора, соответствующей рассматриваемой камере, площади  $S_{pom}$ , ограниченной частью контура ротора, непосредственно находящейся в рассматриваемой камере ЦПД, а также поправочной площади  $S_n$ .

$$S(\gamma) = S_{стат} - S_{pom} - S_n.\tag{6}$$

Площади  $S_{стат}$  и  $S_{pom}$  находятся с помощью формулы для площади, ограниченной произвольной параметрической кривой:

$$S = \int_{t_1}^{t_2} y(t) \frac{dx(t)}{dt} dt, \quad (7)$$

где  $y(t)$ ,  $x(t)$  – параметрические уравнения, описывающие произвольную кривую;  $S_n$  – поправочная площадь, рассчитывается как площадь прямоугольной трапеции:

$$S_n = 2 \left( x_{стат} \left( \frac{\pi}{3}, 0 \right) - x_{ром} \left( \frac{\pi}{3} - \gamma, \gamma \right) \right) \left( y_{стат} \left( \frac{\pi}{3}, 0 \right) + y_{ром} \left( \frac{\pi}{3} - \gamma, \gamma \right) \right). \quad (8)$$

Подставляя в формулу (8) выражения (2) и (5) и проведя преобразования, получим:

$$S_n = \frac{\sqrt{3}}{2} (R_1 - R) \left( \frac{R_1 + R}{2} - 2e \right). \quad (9)$$

Из выражения (9) видно, что величина поправочной площади не зависит от положения ротора и поэтому может быть вычислена один раз и в дальнейшем использована в расчётах как константа  $S_n$ .

Подставляя (2) и (5) в (7), а затем в (6), проведя преобразования и умножив полученное выражение на ширину статора  $H$ , получим итоговое выражение, описывающее зависимость рабочего объёма камеры от угла поворота ротора:

$$V(\gamma) = H \left[ \frac{e\sqrt{3}}{2} (R_1 + 5R) - 3\sqrt{3}eR \cos^2 \gamma + (R_1^2 - R^2) \left( \frac{\pi}{3} + \frac{\sqrt{3}}{4} \right) - S_n \right]. \quad (10)$$

Подставляя в полученное выражение  $\frac{\pi}{2}$  и 0 вместо  $\gamma$ , получим значения максимального и минимального объёма соответственно. Разность полученных объёмов называется полным рабочим объёмом секции ЦПД и определяется следующим образом:

$$V_{hk} = 3\sqrt{3}eRH. \quad (11)$$

**Определение геометрической степени сжатия и объёма камеры сгорания, необходимого для достижения заданной действительной степени сжатия.** Геометрическая (или теоретическая) степень сжатия представляет собой отношение максимального объёма камеры ЦПД к минимальному. Значения этих объёмов были определены ранее. После преобразований получим выражение для теоретической степени сжатия:

$$\varepsilon_m = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = 1 + \frac{18\sqrt{3}eR}{(R_1 - R) \left[ 9\sqrt{3}e + 2\pi(R_1 + R) \right]}. \quad (12)$$

Теоретическая степень сжатия может оказаться слишком высокой, что приведёт к снижению механического КПД и повышению нагрузок на детали двигателя. В данном случае задаются некоторой приемлемой степенью сжатия, называемой действительной, и находят объём камеры сгорания, необходимый для получения данной величины. Исходя из того, что действительная степень сжатия находится по формуле

$$\varepsilon = \frac{V_{\max} + V_c}{V_{\min} + V_c}, \quad (13)$$

где  $V_c$  – объём камеры сгорания, можно найти выражение для определения величины  $V_c$ :

$$V_c = H \left[ \frac{3\sqrt{3}e}{2} \left( R \frac{(\varepsilon+1)}{(\varepsilon-1)} - R_1 \right) - \frac{\pi}{3} (R_1^2 - R^2) \right]. \quad (14)$$

Складывая (10) и (14) и проведя математические преобразования, получим выражение для полного объёма от угла  $\gamma$ :

$$V_{полн}(\gamma) = eRH3\sqrt{3} \left[ \frac{\varepsilon}{\varepsilon-1} - \cos^2 \gamma \right]. \quad (15)$$

Используя полученные зависимости, можно определять геометрические параметры ЦПД потребной размерности, на основе которых выполняются необходимые для проектирования расчёты: тепловой, динамический, кинематический, прочностной и балансировки вала по методикам для четырёхтактных поршневых двигателей с учётом специфики ЦПД.

По сравнению с известной схемой РПД, кроме возможности реализации дизельного цикла, схема ЦПД имеет следующие преимущества:

- как известно, в РПД окончание такта сжатия, воспламенение и сгорание топливной смеси при работе двигателя происходит в одном месте периметра статора при вращении ротора, что вызывает температурную неравномерность корпуса статора и тепловую деформацию его в процессе работы. У ЦПД все такты четырёхтактного цикла происходят в трёх отдельных камерах, равномерно распределённых по эпитрохоиде статора, что уменьшает температурную неравномерность по корпусу статора;

- в РПД пластины радиальных уплотнений установлены в вершинах трёхгранного ротора и при работе вращаются вместе с ним. Герметичность уплотнения должна обеспечиваться силой поджатия пластины пружиной, начиная с запуска и работы на малом газе. При увеличении частоты вращения с ростом центробежных сил увеличивается сила прижатия пластины к статору. Это излишняя сила, которая вызывает износ поверхностей статора и пластины. Для уменьшения центробежной силы пластину стремятся сделать минимальных размеров и массы, что противоречит требованиям по прочности пластины. Разработчик двигателя вынужден искать компромисс между противоречивыми требованиями. По схеме ЦПД радиальные уплотнения установлены в корпусе статора и скользят при работе по поверхности ротора. При вращении ротора уплотнения остаются неподвижными, что снимает ограничения по их массе и габаритам;

- возможность работы ЦПД по дизельному циклу особенно важна для авиационных двигателей и, в первую очередь, для современных ДПЛА, поскольку применение тяжёлых топлив позволяет уменьшить объём топливных баков при сравнимых с бензином расходах. С учётом лучшей экономичности дизельного цикла способность ЦПД работать на тяжёлых топливах позволит значительно уменьшить объём баков и упростить их компоновку в составе летательного аппарата. Дизельное топливо обеспечит работоспособность топливной системы при высотной эксплуатации современных ДПЛА ввиду его меньшей склонности к газообразованию;

- свечи зажигания в РПД постоянно находятся в зоне высоких температур, что накладывает ограничения по их ресурсу и требует применения специальных свечей зажигания, а у ЦПД при работе по дизельному циклу свечи зажигания не применяются;

- при работе четырёхтактного двигателя традиционной схемы с кривошипно-шатунным механизмом за два оборота вала происходит один рабочий ход, у РПД – два рабочих хода, а у ЦПД – три рабочих хода. Это преимущество схемы ЦПД обеспечивает повышение равномерности крутящего момента и литровой мощности двигателя.

Отделом КО-5 СКБ ПАО «Кузнецов» на основе проведённых расчётов выполнена инициативная разработка в программе «КОМПАС-3D» авиационного роторного дизельного двигателя на базе трёхдуговой эпитрохоиды для ДПЛА. Общий вид ЦПД мощностью 50 л.с. представлен на рис. 5.

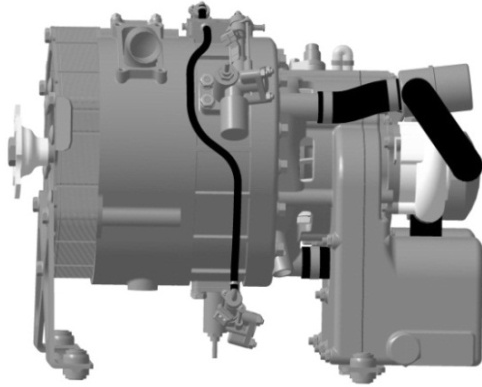


Рис. 5. ЦПД мощностью 50 л.с.

Двигатель снабжён системой впуска воздуха, встроенным стартёр-генератором мощностью 3кВт, автономными системами жидкостного охлаждения и смазки, электронной системой топливопитания и регулирования. Вид основных деталей двигателя представлен на рис. 6.

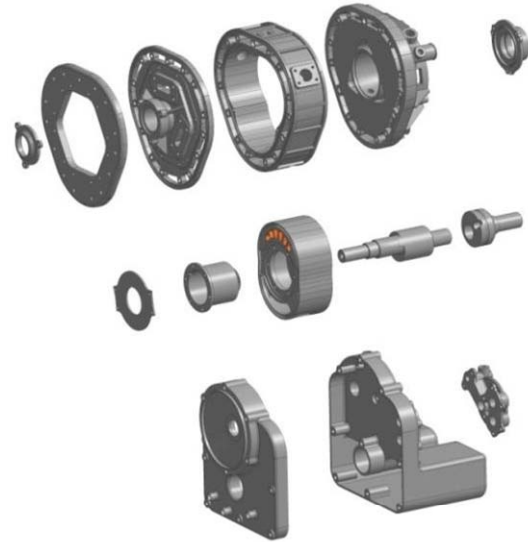


Рис. 6. Основные детали ЦПД

Для сравнения с дизельными двигателями традиционной схемы основные параметры ЦПД-50 приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры дизельных двигателей

	4М364	6М366	ТМЗ-650	ММЗ-3ЛД	QC 480	YND 485	ЦПД-50 (проект)
Мощность, л. с.	36	55	16,3	35	37	46	<b>50</b>
Обороты вала, об/мин	3000	3000	3600	3000	3000	3000	<b>5000</b>
Удельный расход, г/л.с.ч.	180	180	190	190	180	180	<b>150</b>
Рабочий объём, л.	2,34	3,5	0,65	1,6	1,8	2,15	<b>1,02</b>
Габариты: L×B×H, мм	550 590 545	650 590 640	450 465 551	650 550 650	687 494 610	687 494 628	<b>500</b> <b>390</b> <b>390</b>
Масса, кг	265	320	65 (без навесного оборудования)	220	195	200	<b>30</b>
Удельная мощность, л.с./л	15,3	15,7	25,0	21,9	20,5	21,4	<b>49</b>
Удельная масса, кг/л.с.	7,4	5,8	3,9 (без навесного оборудования)	6,3	5,3	4,15	<b>0,6</b>
Объём габаритный, л	176	245	107,6	232	207	213	<b>76</b>
Удельный габаритный объём, л/л.с.	4,9	4,5	6,6	6,6	5,5	4,6	<b>1,5</b>

Приведённые в табл. 1 данные показывают, что двигатель ЦПД-50 имеет преимущества по всем параметрам.

Спроектированный модуль экономичного компактного дизельного двигателя может найти применение в качестве привода электрогенераторов, насосов и компрессоров при наземном использовании.

На базе модуля ЦПД возможно создание эффективных компрессоров с тремя рабочими камерами высокого давления в одной секции. Тематика компрессоростроения является самостоятельным направлением развития технологии роторно-поршневой техники, не менее значимой в своей области, чем РПД в двигателестроении [1]. Потребность в промышленных и медицинских компрессорах сравнима с потребностью в двигателях, а возможно и превосходит её. Двойное применение одной материальной части модулей для изготовления двигателей и компрессоров увеличивает серийность деталей и способствует снижению себестоимости продукции.

На основе базового односекционного модуля двигателя в 50 л.с. увеличением числа секций и применением турбонаддува возможна разработка широкого мощностного ряда двигателей. Такая схема позволяет применением базовой секции уменьшить затраты на подготовку производства и доводку создаваемых более мощных двигателей без значительного увеличения номенклатуры комплектующих деталей.

Модульность – одно из основных положительных качеств двигателей роторно-поршневой схемы. Фирмой «Mazda», достигшей серьёзных успехов в развитии роторно-поршневой тематики [3], на основе секции РПД мощностью 100 л.с. создан двигатель мощностью 1200 л.с. путём объединения в один блок трёх четырёхсекционных модулей. Такое компоновочное решение обеспечивает наилучшие массогабаритные параметры, недостижимые для двигателей традиционной схемы с кривошипно-шатунным механизмом.

Таким образом, выполненная работа даёт возможность разрабатывать лёгкие, компактные, экономичные дизельные двигатели различной мощности для ДПЛА, малой авиации и наземного применения в качестве приводов электрогенераторов, насосов, компрессоров, а также роторные компрессоры с тремя рабочими камерами в одной секции.

Реализация экономичного дизельного цикла в двигателях роторно-поршневой схемы позволит обеспечить при работе на дизельном топливе снижение удельного расхода топлива, по сравнению с бензиновым РПД, на 30%.

### **Библиографический список**

1. Окорочков В.В., Окорочкова В.М., Шафранов В.В. Актуальность и направления развития роторно-поршневой тематики // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2014. № 5 (47), часть 3. С. 82-91.

2. Бениович В.С., Апазиди Г.Д., Бойко А.М. Ротопоршневые двигатели. М.: Машиностроение, 1968. 151 с.

3. Yamamoto K. Rotary Engine. Tokyo-Japan: Published by Sankaido CO Ltd, 1981. 67 p.



## INCREASING THE EFFICIENCY OF ROTARY PISTON ENGINES BY THE USE OF THE DIESEL CYCLE

© 2016

- V. V. Okorochkov** Head of Piston Engine Department , «Kuznetsov» public company, Samara, Russian Federation, [vv\\_okor@mail.ru](mailto:vv_okor@mail.ru)
- V. M. Okorochkova** Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Aircraft Engine Theory, Samara National Research University, Samara, Russian Federation, [nauka@ssau.ru](mailto:nauka@ssau.ru)
- A. I. Ravodin** engineer, «Kuznetsov» public company, Samara, Russian Federation, [DamnedSoulangel@list.ru](mailto:DamnedSoulangel@list.ru)

The article deals with the task of increasing the efficiency of rotary piston engines by implementing an economical diesel cycle in a module with a three-arc epitrochoid and an external gearing kinematics scheme. The necessity of the diesel cycle is caused by the need of reducing specific fuel consumption in rotary piston engines that are currently widely used in light aviation, mostly for remotely piloted aircraft. The Wankel rotary piston engine with a two-arc epitrochoid, though having a number of advantages over traditional piston engines, is inferior to them in efficiency, particularly in partial load modes. The implementation of the diesel cycle in a cycloidal piston engine with a three-arc epitrochoid makes it possible to reduce specific fuel consumption by 30% while retaining the listed positive qualities, as well as to use diesel fuel which is preferable for high-altitude aircraft due to lesser tendency to gas formation in pipelines. The engine stator inner loop is made up by three arcs of the epitrochoid that form three working chambers equally-spaced along the perimeter, which provides a decrease of the stator thermal deformation during the operation of the engine. A method is developed to determine the geometric parameters of a rotary piston engine with a three-arc epitrochoid, and design work is carried out in the KOMPAS-3D code for a 50 h. p. diesel engine to be used in light aviation and as a drive of electrical generators, pumps and compressors for ground application.

*Rotary engines; module; rotor; stator; cooling & ignition systems; light aviation; unmanned aircraft; generator; compressor.*

---

*Citation:* Okorochkov V.V., Okorochkova V.M., Ravodin A.I. Increasing the efficiency of rotary piston engines by the use of the diesel cycle. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2016. V. 15, no. 4. P. 243-251. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-4-243-251

### References

1. Okorochkov V.V., Okorochkova V.M., Shafranov V.V. Significance and directions of development of rotary piston area of research. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2014. No. 5 (47), part 3. P. 82-91. (In Russ.)
2. Beniovich V.S., Apazidi G.D., Boyko A.M. *Rotoporshnevyye dvigateli* [Rotary piston engines]. Moscow: Mashinostoyeniye Publ., 1968. 151 p.
3. Yamamoto K. Rotary Engine. Tokyo, Japan: Published by Sankaido CO Ltd, 1981. 67 p.