

<sup>1</sup>Сибирский государственный  
автомобильно-дорожный университет,  
г. Омск

<sup>2</sup>Калининградский государственный  
технический университет,  
г. Калининград

<sup>3</sup>Павлодарский государственный  
университет им. С. Торайгырова,  
г. Павлодар,  
Республика Казахстан

## ОСОБЕННОСТИ КИНЕМАТИЧЕСКОГО РАСЧЁТА РОТОРНО-ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ ВАНКЕЛЯ

В статье показаны особенности конструкции и принцип действия роторно-поршневого двигателя (РПД) Ванкеля. Приведен анализ научных исследований, направленных на совершенствование конструкции РПД. Предложена методика расчетного исследования, позволяющая графическим способом осуществлять построение цилиндра РПД, имеющего кругообразную форму, поверхность которого выполнена по эпитрохоиде. Обоснован вывод уравнений, позволяющих определять координаты положения точек эпитрохоиды в зависимости от эксцентриситета, величин радиусов начальной образующей эпитрохоиды, зубчатого колеса и неподвижной шестерни. Дано расчетное определение требуемой величины степени сжатия. Показана возможность применения математических пакетов программ с использованием системы Mathcad для вычислений, связанных с изучением особенностей эпитрохоиды двигателя Ванкеля, ее расчетом, исследованием и построением.

**Ключевые слова:** роторно-поршневой двигатель Ванкеля, расчет эпитрохоиды, построение эпитрохоиды, исследование эпитрохоиды.

**Введение.** Идея создания двигателя внутреннего сгорания, работающего по принципу вращательного движения поршня, принадлежит Феликсу Ванкелю (рис. 1). В марте 1954 года Феликс Ванкель создал первые эскизы двигателя, а через три года был совершен первый успешный пуск двигателя на испытательном стенде. Конструкция роторно-поршневого двигателя (РПД) была разработана в 1957 году благодаря сотрудничеству инженеров Вальтера Фройде и Феликса Ванкеля. В новом двигателе не нужно было преобразовывать возвратно-поступательное движение поршня во вращательное движение коленчатого вала, поэтому он мог работать при больших частотах вращения вала, имея малую массу. При равной мощности РПД легче и компактнее обычных поршневых двигателей.

Изучению принципов работы РПД, а также исследованию перспективных направлений совершенствования конструкций РПД посвящен ряд научных статей [1–6]. В работе [1] проводится кинематический и динамический анализ на основе векторной модели механизма двигателя Ванке-

ля. Автор сравнивает динамику двигателя Ванкеля и кривошипно-шатунного механизма поршневого двигателя внутреннего сгорания. Ломовских А. Е. [4] приводит сравнительный анализ технико-эксплуатационных характеристик двигателей внутреннего сгорания роторного типа: «орбитального» двигателя с круговым параллельным движением ротора-поршня (двигатель Сейрича) и двигателя с планетарным движением ротора-поршня (двигатель Ванкеля), указывает преимущества и недостатки каждого из них. В качестве конструкции, способной объединить в себе основные достоинства этих ДВС и устранить имеющиеся у них недостатки, авторы рассматривают новую конструкцию многоцелевого РПД с круговым параллельным движением ротора-поршня, который получил название «орбитального» двигателя, разработанного профессором Воробьевым Ю. В. [4]. Такой двигатель совмещает в себе особенности традиционного поршневого двигателя и альтернативного роторного.

Костюченков А. Н. [6] на основании проведенного анализа результатов расчёта существующих кон-

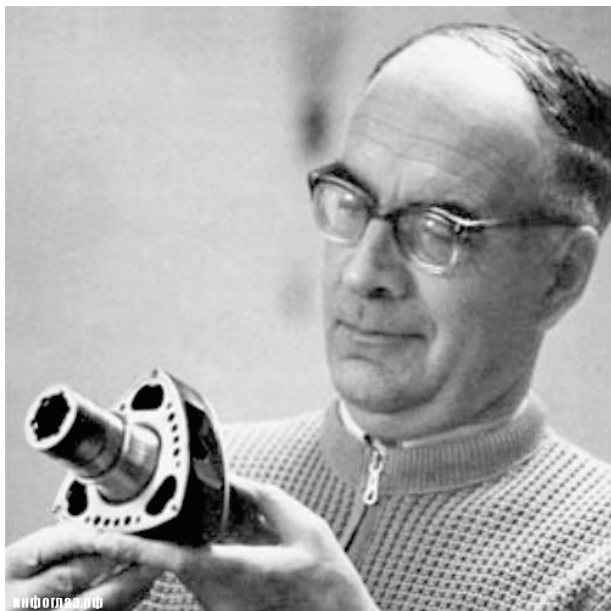


Рис. 1. Изобретатель роторно-поршневого двигателя Феликс Генрих Ванкель (Felix Heinrich Wankel, 1902–1988, Германия)

(Источник: <https://konspekta.net/megaaleksiiru/baza7/1546914724471.files/image024.jpg>)

струкций РПД предлагает комплексную методику расчетов, основанную на использовании новейших программных средств, позволяющих определять геометрическую размерность, а также оценивать характеристики рабочего процесса и тепловое состояние деталей и узлов роторно-поршневых двигателей.

Общий вид РПД и расположение ротора в цилиндре с каналами системы охлаждения представлены на рис. 2. Неподвижная шестерня малого диаметра (число зубьев 34) закреплена к крышке корпуса двигателя, а в её внутреннее отверстие входит вал отбора мощности. При этом можно заметить, что поверхность цилиндра кругообразной формы выполнена по эпитрохоиде. Конструкция РПД подробно рассмотрена в работах [7–11]. Остановимся на некоторых особенностях, связанных с вращательным движением ротора.

Ротор с тремя вершинами насажен на эксцентрик (круглого сечения), входящий в состав вала. Отметим при этом, что диаметр окружности эксцентрика больше диаметра вала. В центре ротора закреплено зубчатое колесо (число зубьев 51), входящее в зацепление с неподвижной шестерней (меньшее из пары зубчатых колес) ( $51/34 = 3/2$ ) [11]. Центр эксцентрично расположенного ротора вращается по окружности вокруг центра вала от-

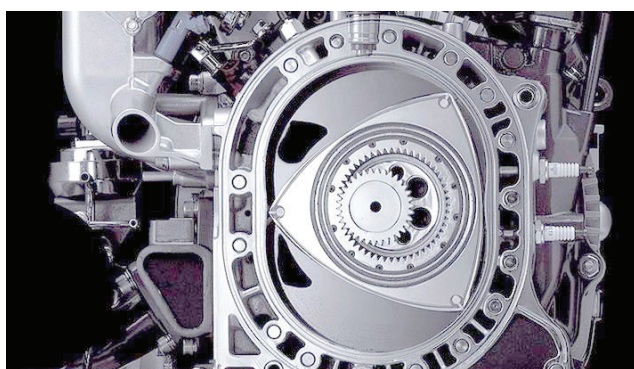
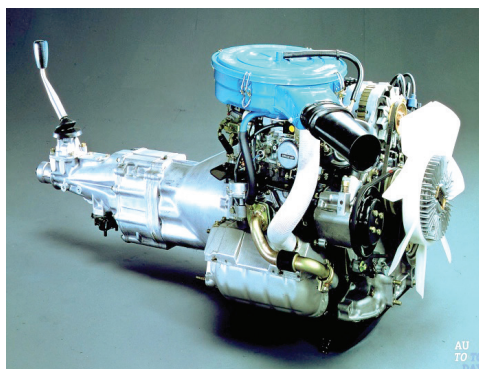


Рис. 2. Общий вид РПД и расположение ротора в цилиндре  
(Источник: <https://neftyanic.ru/wp-content/uploads/2018/12/8333052-706x363.jpg>;  
<https://www.autocentre.ua/wp-content/uploads/2018/03/wankel-rotary-engine.jpg>)

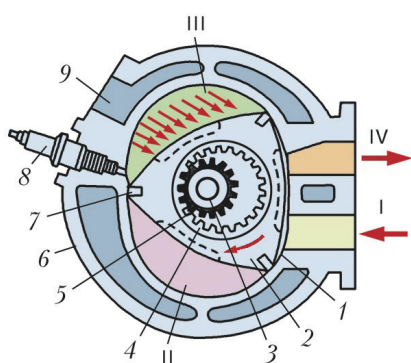


Рис. 3. Разрез двигателя Ванкеля и его основные детали:  
1 — цилиндр; 2 — вращающийся ротор (поршень); 3 — вал отбора мощности с эксцентриком и противовесами; 4 — зубчатое подвижное колесо, жестко связанное с вращающимся ротором;  
5 — неподвижная шестерня; 6 — корпус; 7 — уплотнение; 8 — свеча зажигания;  
9 — жидкостное охлаждение.

Заштрихованные части ротора 2 являются камерами сгорания (их три).  
I — впуск (всасывание); II сжатие; III — расширение (сгорание топлива);  
IV — выпуск отработавших газов

(Источник: <https://bigenc.ru/media/2016/10/27/1235155387/6193.jpg>;  
<https://moto-magazine.ru/img/articles/2013/07-2013/rotor/rotor-5.jpg>)

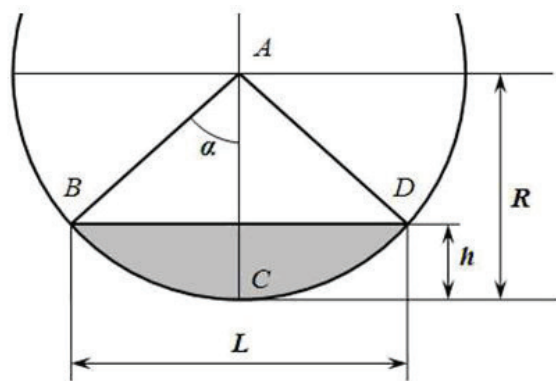


Рис. 4. Определение площади сегмента

бора мощности, обеспечивая сложное планетарное движение наружной поверхности ротора [8]. Треугольный ротор может вращаться в подшипнике скольжения по окружности эксцентрика, а поворот ротора относительно корпуса (статора) осуществляется «обкатыванием» закрепленного в роторе зубчатый колесом внутреннего зацепления вокруг неподвижной шестерни. Чтобы ротор сделал один полный оборот, необходимо эксцентриковому валу совершить три оборота. Для правильного построения эпитрохоиды условное передаточное отношение зубчатого колеса и вращающегося вала отбора мощности должно быть 3/1 [11].

Разрез двигателя Ванкеля и его основные детали (неподвижная шестерня, ротор-поршень с обкатываемым зубчатый колесом, вал отбора мощности с эксцентриком) представлены на рис. 3. Ротор (поршень) приводится во вращательное движение следующим образом. Между статором (корпусом двигателя) и ротором образуются три изолированные рабочие камеры переменного объема. Каждая из вершин трёхгранного ротора совершает движение по эпитрохоиде и отсекает переменные объёмы камер в цилиндре с помощью трёх радиальных уплотнений. В данных камерах происходит процесс впуска горючей смеси (1 часть топлива и 15 частей воздуха), сжатие, воспламенение от искры системы зажигания, сгорание, расширение (рабочий ход) и выпуск отработавших газов. В процессе сгорания топлива повышаются температура и давление, которое действует на поверхность ротора. Возникающая сила, действующая на плечо эксцентрика, создаёт крутящий момент, и ротор приводится во вращательное движение [11].

**Основная часть.** Из технической литературы известно, что двигатель Ванкеля работает по четырёхтактному циклу [8]. При этом за один оборот ротора-поршня, у которого три вершины и три камеры сгорания между вершинами, осуществляются три последовательно чередующихся цикла [8, 11]. Вал отбора мощности совершает три оборота при одном обороте ротора-поршня. С учетом сказанного выше можно условно считать, что двигатель Ванкеля работает по особому циклу. За один оборот ротора-поршня протекает двенадцать последовательно чередующихся тактов. Цикл (круговой процесс) протекает с чередованием следующих тактов: *впуска, сжатия, рабочего хода, выпуска*. Подробное описание работы двигателя на каждом такте приведено в работах [8, 10, 11].

**1. Расчетное определение требуемой степени сжатия РПД.** Для эффективной, надёжной и долго-

вечной работы РПД важным является **выбор степени сжатия**. У обычного поршневого бензинового двигателя с кривошипно-шатунным механизмом степень сжатия представляет собой число, характеризующее отношение полного объёма цилиндра к объёму камеры сгорания (у бензиновых двигателей она равна 8–12). Для определения требуемой степени сжатия РПД в данной работе предлагается методика, изложенная ниже.

1. При повороте ротора на такте впуска фиксируем его положение, при котором объём камеры впуска должен достигать своего максимального значения.

2. Вычерчиваем на миллиметровой бумаге в определенном масштабе графическое изображение площади камеры впуска.

3. Полученную площадь разбиваем на элементарные фигуры (треугольники, квадраты, прямоугольники, сегменты), определим отдельно их площади и их суммарное значение.

Площадь сегмента можно определить расчетным путем. Площадь сегмента  $BCD$  равна площади сектора  $ABCD$  за вычетом площади треугольника  $ABD$  (рис. 4).

$$S_{BCD} = S_{ABCD} - S_{ABD};$$

$$S_{ABCD} = \alpha \cdot R^2 = R^2 \arccos\left(1 - \frac{h}{R}\right);$$

$$\left(\cos \alpha = \frac{AE}{AB} = \frac{R-h}{R} = 1 - \frac{h}{R}, \alpha = \arccos\left(1 - \frac{h}{R}\right)\right);$$

$$S_{ABD} = L \cdot (R-h) / 2 =$$

$$= (R-h)\sqrt{R^2 - (R-h)^2} = (R-h)\sqrt{2Rh - h^2};$$

$$S_{BCD} = R^2 \arccos\left(1 - \frac{h}{R}\right) - (R-h)\sqrt{2Rh - h^2}. \quad (1)$$

Зная максимальную площадь рабочей камеры на такте впуска (например, 80 см<sup>2</sup>) и ширину ротора (например, 5 см), определим общий объём камеры впуска  $V_{вн}$ , который в нашем примере равен 400 см<sup>3</sup>.

Аналогичным способом определяем постоянный объём камеры сгорания в роторе (их три). Предположим, что объём камеры сгорания  $V_{кc} = 50$  см<sup>3</sup>. Полный объём рабочей камеры на такте впуска

$$V_n = V_{вн} + V_{кc} = 400 + 50 = 450 \text{ см}^3. \quad (2)$$

Степень сжатия определим как отношение полного объёма камеры для такта впуска  $V_n$  к объёму камеры сгорания  $V_{кc}$ , расположенной в корпусе ротора

$$\varepsilon = V_n / V_{кc} = 450 / 50 = 9. \quad (3)$$

При работе РПД на бензине марки Аи-98 с высоким октановым числом для устранения возможного детонационного (взрывного) сгорания смеси топлива с воздухом степень сжатия не должна превышать 9–11.

**2. Графический метод построения эпитрохоиды РПД Ванкеля.** Эпитрохоида (от греч. *epi* — на и *trochos* — колесо) — плоская кривая, образуемая точкой, жёстко связанной с окружностью, ко-

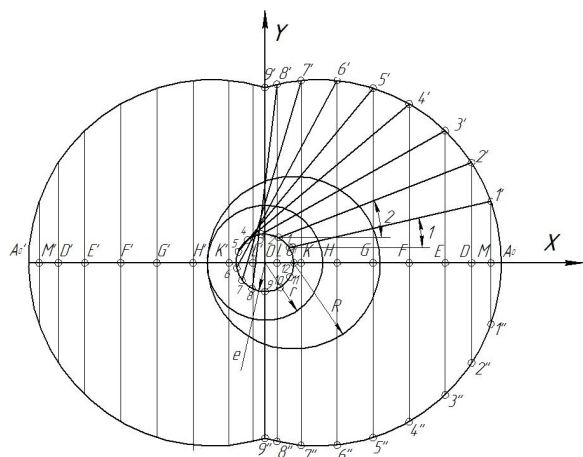


Рис. 5. Построение эпитрохоиды роторно-поршневого двигателя

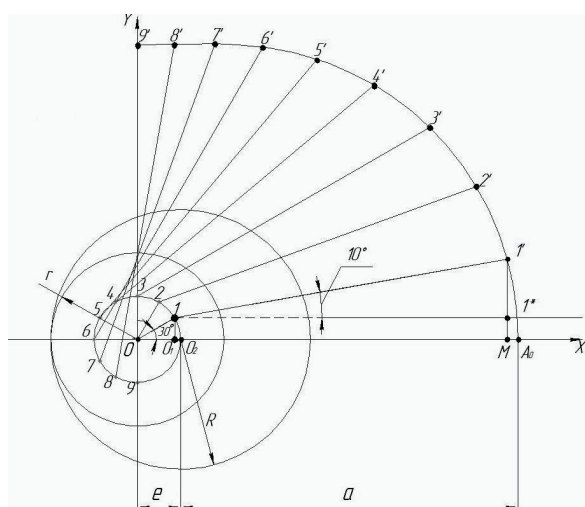


Рис. 6. Определение начального максимального радиуса эпитрохоиды в точке  $A_0$

торая катится без скольжения по внешней стороне другой окружности [12]. На рис. 5 приведён теоретический контур РПД — двухдуговая эпитрохоида.

В технической литературе по теме исследования уравнение эпитрохоиды приводится в виде [13]

$$\begin{cases} x = e \cos \varphi + R \cos(u + 1)\varphi \\ y = e \sin \varphi + R \sin(u + 1)\varphi, \end{cases}$$

где  $\varphi$  — угол поворота, характеризующий планетарное движение;  $e$  — эксцентриситет;  $R$  — радиус.

В машиностроении кривая типа эпитрохоида играет важную роль. Например, математическая модель процесса обработки отверстий инструментом с планетарным движением определяет форму траекторий перемещения точек лезвий инструмента, представляющих собой *трохоидальные кривые* (эпитрохоиду при вращении по круговой подаче и гипотрохоиду при вращении против круговой подачи) [13]. Ли С. В, Ахметов Г. М. и Абдулов О. Г. в своей работе [14] отмечают, что процесс обработки контура рабочего органа (ротора) обладает особой спецификой по сравнению с другими технологическими процессами изготовления деталей

рабочего органа строительно-дорожных машин с планетарно-роторным движением. Например, при обработке контура рабочей полости ковшей погрузчиков сначала методом обкатки шлифуют копир. При этом центр шлифовального круга движется по эпитрохоиде [14].

Окорочков В. В. с соавторами рассматривают вопросы повышения эффективности поршневых роторных двигателей путём реализации экономичного дизельного цикла в модуле с трёхдуговой эпитрохоидой и кинематической схемой с внешним зацеплением [3]. По мнению авторов, применяемая в настоящее время схема РПД Ванкеля с двухдуговой эпитрохоидой не может обеспечить степень сжатия более 12, что недостаточно для реализации дизельного цикла. Это вынуждает обратиться к схеме циклоидального поршневого двигателя с трёхдуговой эпитрохоидой, обеспечивающей повышение степени сжатия [3].

Как известно, на практике используются двигатели Ванкеля с трёхгранными роторами, в которых отношение радиусов подвижного зубчатого колеса  $R$  и неподвижной шестерни  $r$  рассматривается как  $3/2$ . При выборе радиусов синхронизирующих шестерён  $r$  и  $R$  с определённым эксцентриситетом ( $e = R - r$ ) необходимо учесть возможность прохода эксцентрикового вала отбора мощности через центральное отверстие малой неподвижной шестерни радиусом  $r$ . Для нашего примера выберем значения  $R = 54$  мм,  $r = 36$  мм,  $e = 18$  мм,  $C = 2,6$  — безразмерный параметр, определяющий размеры двигателя ( $C = 2,1 - 2,7$ ) [7].

Неподвижная шестерня радиусом делительной окружности  $r$  жёстко соединена болтами с корпусом двигателя, в связи с чем она не имеет возможности поворачиваться. В центре шестерни имеется отверстие с расположенным в нем подшипником скольжения, который выполнен из стальной ленты толщиной около 2 мм. В отверстие с зазором 10–20 мкм входит вращающийся вал отбора мощности с радиусом  $r_v$ . Для того, чтобы обеспечить условное передаточное отношение  $3/1$  для зубчатого колеса с радиусом делительной окружности  $R = 54$  мм, радиус вала  $r_v$  должен быть 18 мм ( $54/18 = 3$ ).

Алгоритм построения эпитрохоиды описан в работах [11, 15, 16]. На рис. 5, 6 представлены графически основные этапы построения. Прокомментируем некоторые из них.

1. В начале строим окружность неподвижной обкатываемой шестерни радиусом  $r = 36$  мм с центром в точке  $O(0;0)$ .

2. Значение эксцентриситета вала отбора мощности определяем по формуле:  $e = R - r = 54 - 36 = 18$  мм и строим окружность радиусом  $e = 18$  мм с центром в точке  $O$ . Точка  $O_2$  появляется в результате пересечения окружности радиусом  $e$  с осью  $Ox$  (рис. 5).

3. Из центра в точке  $O_2$  строим *производящую* делительную окружность вращающегося зубчатого колеса радиусом  $R = 54$  мм (рис. 6). В данном случае речь идёт о подвижном *обкатываемом* зубчатом колесе, которое жёстко закреплено в роторе и вращается вместе с ним.

4. Окружность, образованную радиусом  $e$  из точки  $O$ , условно делим на 12 частей через  $30^\circ$ . В результате построения мы получим 12 точек (1–12) на данной окружности. Эти точки позволяют определить положение вала при его повороте. Вал ротора поворачивается в три раза быстрее производящей окружности радиусом  $R$ .

При повороте ротора с радиусом производящей окружности  $R$  на каждые  $10^\circ$  вал, вращающийся внутри неподвижной шестерни с радиусом  $r$ , повернётся на угол  $30^\circ$ .

5. Производящий (начальный максимальный) радиус эпитрохоиды находим по формуле  $a = C \cdot R = 2,6 \cdot 54 = 140,4$  мм (рис. 6).

6. Определяем текущие значения координат точек (точки 1–8) эпитрохоиды. С этой целью при повороте вала на каждые  $30^\circ$  строим прямоугольный треугольник с острым углом, равным  $10^\circ$ , и гипотенузой  $a$ , равной  $140,4$  мм. В конце данной гипотенузы обозначаем соответствующую точку эпитрохоиды. Окружность с радиусом  $R$  и соединённый с ней ротор повернутся против часовой стрелки на угол  $10^\circ$ . В точках 1–8 определяем значения образующей эпитрохоиды.

Произведем расчет координат образующей точки эпитрохоиды  $A_0$  по осям  $Ox$  и  $Oy$  с последующим выводом общей формулы, позволяющей находить координаты произвольной точки эпитрохоиды. В прямоугольном треугольнике  $\Delta_{0-1-0_1}$  значение прилежащего катета  $OO_1 = e \cdot \cos 30^\circ$  (рис. 6). В прямоугольном треугольнике  $\Delta_{1-1^*-1}$  длина прилежащего катета  $1-1^* = a \cdot \cos 10^\circ = C \cdot R \cdot \cos 10^\circ$ . Тогда координата  $x$  в точке  $1^*$  (длина отрезка  $OM$  (рис. 5, 6) может быть определена как сумма длин отрезков  $OO_1$  и  $1-1^*$  [ $OM = OO_1 + (1-1^*)$ ]).

Действуя аналогичным образом, находим соответствующие координаты по оси  $Ox$  точек  $2', 3', \dots, 8'$ . Получим выражение

$$x = e \cdot \cos(n\varphi) + C \cdot R \cdot \cos \varphi. \quad (4)$$

Соответствующее выражение для определения ординаты точки эпитрохоиды ( $y$ ):

$$y = e \cdot \sin(n\varphi) + C \cdot R \cdot \sin \varphi. \quad (5)$$

В общем виде координаты ( $x$ ;  $y$ ) произвольной точки эпитрохоиды могут быть найдены по формулам:

$$\begin{cases} x = (R - r) \cdot \cos(n\varphi) + R \cdot C \cdot \cos \varphi; \\ y = (R - r) \cdot \sin(n\varphi) + R \cdot C \cdot \sin \varphi. \end{cases} \quad (6)$$

### 3. Расчёт, построение и исследование эпитрохоиды с использованием системы Mathcad.

Как показывает практика, громоздкие расчеты, которые встречаются в большинстве технических исследований, удобно производить с использованием существующих математических пакетов программ, позволяющих максимально оптимизировать процессы вычислений, а также получить графические представления рассматриваемых объектов. Mathcad является одной из таких программ, наиболее часто применяемых для работы с математическими или инженерными вычислениями. Покажем применение возможностей Mathcad для проведения расчетов и построения эпитрохоиды по уравнениям (6).

На первом шаге необходимо задать исходные данные:  $R := 54$  мм (символ «:=» означает присваивание величине её значения);  $r := 36$  мм;  $n := 3$ ;  $C := 2,6$ ;  $e := R - r = 18$  мм. Затем переводим в радианы значения градусных мер углов тригонометрических функций. Для этого вводим переопределение функций:

$$\sin(\varphi) := \sin\left(\varphi \cdot \frac{\pi}{180}\right);$$

$$\cos(\varphi) := \cos\left(\varphi \cdot \frac{\pi}{180}\right).$$

Система уравнений (6) примет вид:

$$x(\varphi) := (R - r) \cdot \cos(n\varphi) + R \cdot C \cdot \cos(\varphi),$$

$$y(\varphi) := (R - r) \cdot \sin(n\varphi) + R \cdot C \cdot \sin(\varphi).$$

Для выполнения расчетов по вышеуказанным формулам зададим диапазон выводимых чисел

Таблица 1

Расчётные значения координат точек эпитрохоиды

φ, град.	x, мм	y, мм	φ, град.	x, мм	y, мм	φ, град.	x, мм	y, мм
0	158,40	0	100	-15,38	122,68	200	-140,93	-63,61
10	153,86	33,38	110	-32,43	122,93	210	-121,59	-88,20
20	140,93	63,61	120	-52,20	121,59	220	-98,55	-105,84
30	121,59	88,20	130	-74,66	116,55	230	-74,66	-116,55
40	98,55	105,84	140	-98,55	105,84	240	-52,20	-121,59
50	74,66	116,55	150	-121,59	88,20	250	-32,43	-122,93
60	52,20	121,59	160	-140,93	63,61	260	-15,38	-122,68
70	32,43	122,93	170	-153,86	33,38	270	0	-122,40
80	15,38	122,68	180	-158,40	0	280	15,38	-122,68
90	0	122,40	190	-153,86	-33,38	290	32,43	-122,93

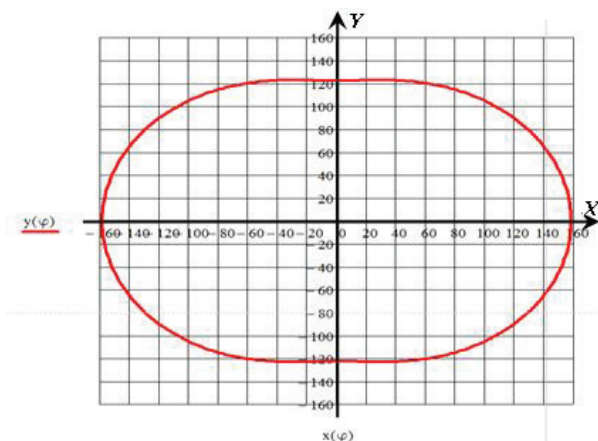


Рис. 7. Построение эпитрохоиды в системе Mathcad

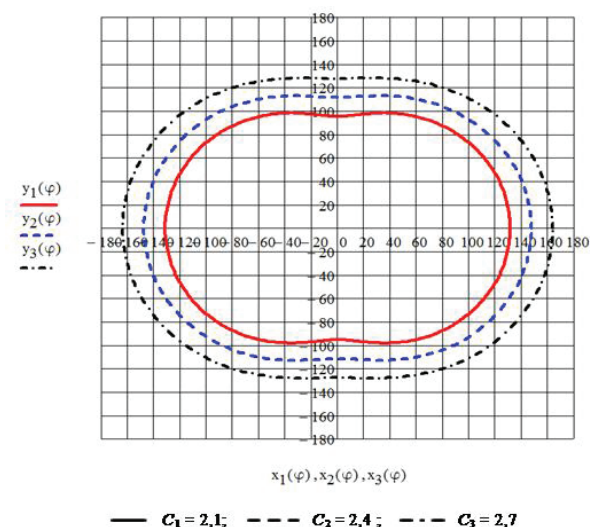
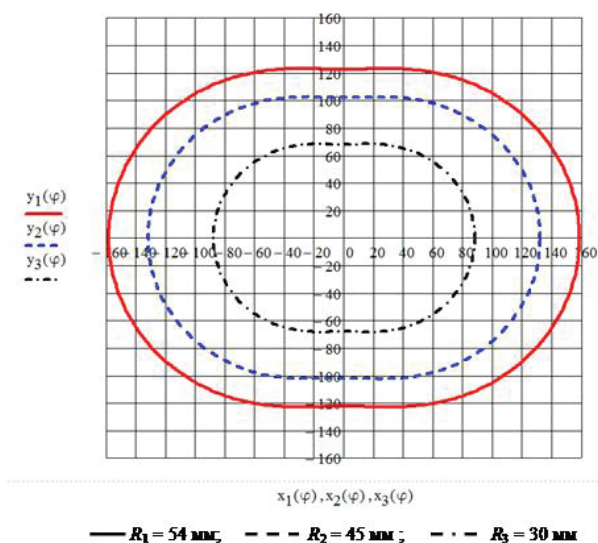


Рис. 8. Влияние радиуса обкатываемого зубчатого колеса  $R$  и безразмерного параметра  $C$  на изменение формы эпитрохоиды

с определенным шагом, например, 10 градусов:  $\varphi = 0, 10, \dots, 360$ . В табл. 1 приведены расчётные данные после обработки [11].

На последнем шаге, выбрав на панели инструментов кнопку «График» (предварительно задав

шаг расчета, равный 1 градусу:  $\varphi = 0,360$ ), вставляем в затенённые клетки величины, указанные в табл. 1, и получаем график эпитрохоиды (рис. 7). Отметим, что использование возможностей системы Mathcad позволяет исследовать влияние на вид эпитрохоиды различных значений геометрических параметров РПД ( $R, r, n, e, C$ ). Исследовано влияние (рис. 8) радиуса обкатываемого зубчатого колеса  $R$  и безразмерного параметра  $C$  на изменение формы эпитрохоиды и габаритных размеров РПД.

#### Выводы.

1. Проведен анализ основных направлений научных исследований в области усовершенствования конструкций роторно-поршневых двигателей (РПД). Рассмотрены их технические особенности и принцип действия (на примере РПД Ванкеля).
2. Рассмотрена методика аналитического (расчетного) и графического построения цилиндра РПД, имеющего кругообразную форму, поверхность которого выполнена по эпитрохоиде. Приведена система уравнений, которая позволяет определять положение точек эпитрохоиды в зависимости от определяющих ее параметров (значения эксцентриситета, радиусов начальной образующей эпитрохоиды, зубчатого колеса, неподвижной шестерни).
3. Дано расчётное определение требуемой величины степени сжатия при работе РПД на бензине.
4. Применены программные средства с использованием системы Mathcad для расчета, построения и исследования эпитрохоиды двигателя Ванкеля. Исследовано влияние радиуса обкатываемого зубчатого колеса  $R$  и безразмерного параметра  $C$  на изменение формы эпитрохоиды и габаритных размеров РПД.

#### Библиографический список

1. Косенок Б. Б. Кинематический и динамический анализ основного механизма двигателя Ванкеля на основе его векторной модели // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2011. № 1 (25). С. 69–75.
2. Рындин В. В., Шалай В. В., Макушев Ю. П. Расчет цикла бензинового двигателя в системе Mathcad // Вестник СибАДИ. 2013. № 6 (34). С. 91–98.
3. Окорочков В. В., Окорочкова В. М., Раводин А. И. Повышение эффективности двигателей роторно-поршневой схемы реализацией дизельного цикла // Вестник Самарского государственного университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15, № 4. С. 243–251. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-4-243-251.
4. Ломовских А. Е., Иванов В. П., Свиридов А. А. [и др.]. Альтернативные двигатели внутреннего сгорания // Повышение эффективности использования мобильных энергетических средств в различных режимах движения: сб. тр. конф. / под общ. ред. О. И. Поливаева, О. М. Костикова, А. В. Божко. 2017. С. 322–329. ISBN 978-5-7267-0933-8.
5. Зиновьев И. В., Кутенев В. Ф. Разнообразие двигателей внутреннего сгорания (на примере роторно-поршневых двигателей) // Труды НАМИ. 2015. № 261. С. 6–27.
6. Костюченко А. Н., Зеленцов А. А., Семенов П. В. [и др.]. Разработка односекционного роторно-поршневого двигателя-демонстратора на основе современной комплексной методики расчёта // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королёва (национального исследовательского университета). 2014. № 5-2 (47). С. 173–181.
7. Ханин Н. С., Чистозвонов С. Б. Автомобильные роторно-поршневые двигатели. М.: Машгиз, 1964. 184 с.
8. Алексеев В. П., Воронин В. Ф., Грехов Л. В. [и др.]. Двигатели внутреннего сгорания. Устройство и работа поршневых

и комбинированных двигателей / под общ. ред. А. С. Орлина, М. Г. Круглова. 4-е изд. перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1990. 283 с. ISBN 5-217-00117-8.

9. Макушев Ю. П., Иванов А. Л. История двигателестроения и введение в направление. 2-е изд., дераивативное. Омск: СибАДИ, 2018. 89 с.

10. Макушев Ю. П., Полякова Т. А., Рындин В. В., Токтаганов Т. Т. Интегральное и дифференциальное исчисления в приложениях к технике: моногр. / под ред. Ю. П. Макушева. Павлодар: Кереку, 2013. 330 с. ISBN 978-601-238-300-3.

11. Макушев Ю. П., Полякова Т. А., Рындин В. В. Построение эпитрохоиды роторно-поршневого двигателя графическим и расчетным методами с использованием системы Mathcad // Вестник ПГУ. Энергетическая серия. 2020. № 1. С. 279–291.

12. Крайнев А. Ф. Словарь-справочник по механизмам. М.: Машиностроение, 1981. 438 с.

13. Энциклопедия по машиностроению. URL: <https://mash-xxl.info/info/207200/> (дата обращения: 20.05.2020).

14. Ли С. В., Ахметов Г. М., Абдулов О. Г. Обработка циклоидального контура рабочего органа // Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серкибаева. 2006. № 1. С. 50–53.

15. Уханов А. П. Автомобильные и тракторные двигатели. Курсовое проектирование. Пенза, 2005. 192 с.

16. Вайсенбургер Д. А., Черноусанов В. В. Эпитрохоида роторно-поршневого двигателя: ее свойства и построение // Техника и технологии строительства. 2017. № 2 (10). С. 5–11.

**МАКУШЕВ Юрий Петрович**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Тепловые двигатели и автотракторное электрооборудование» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ), г. Омск. SPIN-код: 4777-2831

AuthorID (РИНЦ): 650763

Адрес для переписки: makushev321@mail.ru

**ПОЛЯКОВА Татьяна Анатольевна**, кандидат педагогических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Физика и математика» СибАДИ, г. Омск.

SPIN-код: 4090-8339

AuthorID (РИНЦ): 652910

ORCID: 0000-0002-9673-1750

Адрес для переписки: ta\_polyakova@mail.ru

**ВОЛКОВА Лариса Юрьевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры судовых энергетических установок и теплоэнергетики Калининградского государственного технического университета, г. Калининград.

SPIN-код: 9822-6287

AuthorID (РИНЦ): 1013467

Адрес для переписки: volkova0969@mail.ru

**РЫНДИН Владимир Витальевич**, кандидат технических наук, профессор кафедры «Механика и нефтегазовое дело» Павлодарского государственного университета им. С. Торайгырова, г. Павлодар, Республика Казахстан.

SPIN-код: 1687-9720

AuthorID (РИНЦ): 929600

Адрес для переписки: rvladvit@yandex.kz

#### Для цитирования

Макушев Ю. П., Полякова Т. А., Волкова Л. Ю., Рындин В. В. Особенности кинематического расчёта роторно-поршневого двигателя Ванкеля // Омский научный вестник. 2020. № 5 (173). С. 22–28. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-173-22-28.

Статья поступила в редакцию 03.08.2020 г.

© Ю. П. Макушев, Т. А. Полякова, Л. Ю. Волкова, В. В. Рындин