

¹Сибирский государственный
автомобильно-дорожный университет,
г. Омск

²Калининградский государственный
технический университет,
г. Калининград

³Павлодарский государственный
университет им. С. Торайгырова,
г. Павлодар, Республика Казахстан

КИНЕМАТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ КУЛАЧКОВ ВЫПУКЛОГО ПРОФИЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММЫ MATHCAD

В статье показаны особенности построения кулачков с выпуклым профилем, приведена методика кинематического расчета толкателя при его движении по выпуклой и закругленной поверхности. Предложена методика, позволяющая определять центр координат радиуса выпуклой поверхности кулачка. Выполнены расчеты хода, скорости и ускорения толкателя в зависимости от угла поворота кулачкового вала с применением системы Mathcad. С использованием программы Mathcad для кулачков с выпуклым профилем построены графики подъема толкателя, изменения его скорости и ускорения. Предложенная методика расчета кулачков выпуклого профиля различных размеров с определением высоты подъема, скорости, ускорения толкателя и построения их графиков в системе Mathcad позволит проектировать кулачки и копиры, необходимые для обработки кулачковых валов.

Ключевые слова: механизмы двигателя, выпуклый кулачок, вывод формул, расчет кинематики толкателя, программа Mathcad, графики.

Введение. Кулачки служат для преобразования вращательного движения вала в поступательное движение толкателя. В большинстве случаев профиль кулачков очерчивается дугами окружностей нескольких радиусов или прямыми и дугами. На рис. 1 показан механизм газораспределения двигателя, клапан которого приводится в движение выпуклым кулачком при помощи плоского толкателя.

В работах зарубежных и отечественных авторов представлены многочисленные исследования, посвященные вопросам моделирования, проектирования и анализа кулачковых механизмов. Большинство из представленных научных разработок направлено на решение вопросов оптимизации соответствующих конструкций.

Так, например, R. D. V. Prasad (с соавт.) проводит анализ модели кулачкового и следящего механизма с целью его модификации, направленной на уменьшение контактных напряжений, которые возникают на рабочих поверхностях кулачка и толкателя [1]. На основе анализа геометрических параметров авторы выводят выражения для перемещения, скорости и ускорения, расширяя при этом кинематический и динамический анализ [1]. Anindya Ghosh предлагает вариант графического

построения различных типов профилей кулачков сброса на примере линейных, простых гармонических, параболических, циклоидальных, используемых для высокоскоростного ткачества [2]. Исследование L. S. Yousuf и N. H. Hadi посвящено анализу механизма грушевидного кулачка и роликового толкателя для различного положения толкателя и контактной нагрузки сжатия, с целью изучения «влияния контактной сжимающей нагрузки на распределение контактных напряжений профиля кулачка в точке контакта» [3]. Д. В. Гринев (с соавт.) выполнил кинематический анализ рычажно-кулачкового механизма для роторно-лопастного двигателя с внешним подводом тепла. Автором получены и подтверждены «экспериментально аналитические выражения для линейных и угловых скоростей и ускорений точек и звеньев роторно-лопастного двигателя» [4, с. 247]. В научной статье А. В. Васильева представлены «результаты использования численного метода формирования профиля кулачков механизма газораспределения двигателя внутреннего сгорания (ДВС) для профилирования динамически настроенных кулачков» [5, с. 79].

Особое внимание в научных разработках по вопросам исследования кулачковых механиз-

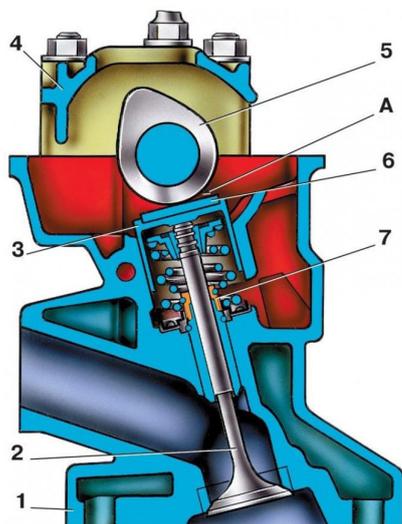


Рис. 1. Механизм газораспределения двигателя:

- 1 — блок цилиндров;
2 — клапан; 3 — толкатель; 4 — крышка клапанов;
5 — кулачковый вал;
А — зазор 0,15–0,2 мм в холодном состоянии двигателя;
6 — пластина толкателя; 7 — уплотнение (сальник)
(Источник: https://avtorial.ru/VAZ/vaz_2115-14/43.gif)

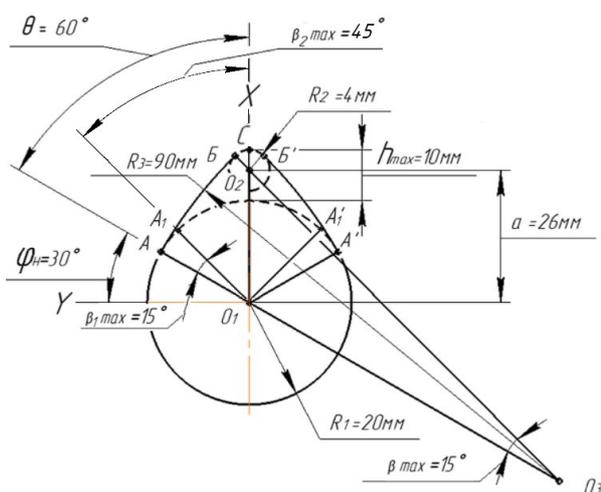


Рис. 2. Кулачок с выпуклым профилем

мов уделяется применению цифровых технологий. По мнению Н. Н. Эльяш, «использование аналитических методов с применением компьютерных программ позволяет более точно, чем при графическом интегрировании, воспроизвести закон движения, вычислить кинематические параметры, рассчитать полярные координаты профиля» [6, с. 31]. В подтверждение своих слов автор предлагает алгоритм оптимизации параметров кулачкового механизма, основанный на применении компьютерных технологий и включающий в себя этапы ввода исходных данных, определения кинематических и геометрических параметров, анализа результатов и их оценки по заданным критериям [6]. В работе В. М. Понятского и А. В. Романова представлена реализация переменного профиля кулачкового механизма с использованием возможностей пакета прикладных программ Matlab [7]. Преимущества применения инженерного математического программного обеспечения Mathcad на примере кинематического

расчета тангенциальных кулачков представлены в работах [8, 9].

Различные виды кулачков можно рассматривать как круглую цилиндрическую шайбу определенной ширины, к которой как бы присоединили рабочий выступ кулачка. Толкатели по конструктивному исполнению бывают роликового и плоского типов. По внешнему виду кулачки, которые используют в системах и механизмах ДВС, бывают тангенциальные, выпуклые и вогнутые. Выпуклый профиль кулачка применяют для подъема плоского или выпуклого толкателей, тангенциальный и вогнутый — главным образом, для роликовых толкателей.

Заготовки кулачковых валов могут быть литыми или штампованными. Кулачки штампованных распределительных валов обрабатывают на специальных копировально-токарных, а затем на копировально-шлифовальных станках. После термической обработки снова выполняют операции шлифования и полирования по копиру. Для изготовления копира необходимо знать размеры профиля кулачка.

При разработке кулачков возможно проектирование центрового и действительного профиля. **Центровой профиль** представляет собой траекторию движения центра ролика вокруг внешней поверхности кулачка. **Действительный профиль** — это внешний профиль кулачка.

Рассмотрим пример кинематического расчета кулачков с выпуклым профилем с использованием программы Mathcad.

1. Аналитический расчет кулачка с выпуклым профилем. Профиль кулачка начинают строить, проводя из центра координат начальную окружность. Ее радиус R_1 выбирают из условия обеспечения достаточной жесткости кулачкового вала механизма газораспределения или вала насоса высокого давления для подачи топлива. Величина R_1 зависит от максимальной высоты подъема толкателя h_{\max} и определяется выражением $R_1 = (1,5 \dots 3,0) h_{\max}$.

Величина h_{\max} выбирается в зависимости от хода плунжера насоса высокого давления или хода клапана механизма газораспределения двигателя.

1.1. Исходные данные:

1. Радиус начальной окружности, $R_1 = 20$ мм (рис. 2).

2. Радиус дуги (закругления) вершины кулачка, $R_2 = 4$ мм (получен расчетным путем). Значение R_2 должно быть более 2 мм.

3. Радиус боковой дуги выпуклого кулачка $R_3 = 90$ мм (получен расчетным путем).

4. Максимальный ход плоского толкателя, $h_{\max} = 10$ мм.

Величину a , расположенную между центрами окружностей радиусами R_1 и R_2 , определяют из выражения

$$a = (R_1 + h_{\max}) - R_2 = (20 + 10) - 4 = 26 \text{ мм.}$$

Расчетным путем величину радиуса R_3 боковой дуги кулачка определим из выражения [10, 11]

$$R_3 = \frac{a^2 + R_1^2 - R_2^2 - 2 \cdot a \cdot R_1 \cdot \cos \theta}{2 \cdot (R_1 - R_2 - a \cdot \cos \theta)}. \quad (1)$$

По формуле (1) при $R_1 = 20$ мм, $R_2 = 4$ мм, $a = 26$ мм, $\theta = 60^\circ$ получим

$$R_3 = \frac{26^2 + 20^2 - 4^2 - 2 \cdot 26 \cdot 20 \cdot \cos 60^\circ}{2 \cdot (20 - 4 - 26 \cos 60^\circ)} = 90 \text{ мм.}$$

Отношение R_3 к величине h_{\max} должно лежать в пределах 8–20.

Радиус дуги вершины кулачка R_2 находим по формуле [10, 11]

$$R_2 = \frac{R_1 \cdot (R_3 - R_1 - h_{r \max}) - 0,5h_{r \max}^2 - (R_3 - R_1) \cdot (R_1 + h_{r \max}) \cdot \cos \theta}{(R_3 - R_1 - h_{r \max}) - (R_3 - R_1) \cdot \cos \theta} = \\ = \frac{20(90 - 20 - 10) - 0,5 \cdot 10^2 - (90 - 20) \cdot (20 + 10) \cdot \cos 60^\circ}{(90 - 20 - 10) - (90 - 20) \cdot \cos 60^\circ} = 4 \text{ мм.} \quad (2)$$

1.2. Порядок построения профиля выпуклого кулачка.

Проводим оси координат X и Y . В центре их пересечения отмечаем точку O_1 , из которой проводим начальную окружность радиусом $R_1 = 20$ мм (рис. 2). В точке пересечения окружности с осью Y откладываем отрезок, равный $h_{r \max} = 10$ мм. Из верхней точки данного отрезка вниз по оси отмеряем величину, равную 4 мм, и из данного центра O_2 проводим окружность радиусом закругления вершины кулачка, $R_2 = 4$ мм.

Для определения положения центра координат радиуса боковой дуги выпуклого кулачка $R_3 = 90$ мм поступаем следующим образом.

1. Определяем радиус вспомогательной окружности R_4 , выходящей из центра O_1 : $R_4 = R_3 - R_1 = 90 - 20 = 70$ мм.

2. Определяем радиус другой вспомогательной окружности R_5 , выходящей из центра O_2 : $R_5 = R_3 - R_2 = 90 - 4 = 86$ мм.

3. Из центра O_1 радиусом $R_4 = 70$ мм проводим дугу. Дополнительно проводим дугу из центра O_2 радиусом $R_5 = 86$ мм. Точка пересечения двух дуг и есть центр окружности O_3 радиуса боковой дуги выпуклого кулачка $R_3 = 90$ мм. При помощи радиуса $R_3 = 90$ мм делаем плавное сопряжение двух окружностей с радиусами $R_1 = 20$ мм и $R_2 = 4$ мм и получим участок выпуклого кулачка.

Угол θ равен 60° . От точки A до точки B скользит плоский толкатель по выпуклой поверхности (боковой дуге), совершая подъем.

Высота подъема толкателя зависит от величины радиусов R_1 , R_2 , R_3 , межцентрового расстояния a между окружностями радиусом R_1 и R_2 , максимального хода толкателя h_{\max} и величины угла β ($\angle AOB$). Значение угла β зависит от длины радиуса R_3 , расстояния между точками A и B (рис. 2).

Угол AO_3B , равный 15° , из центра O_3 переносим в центр начальной окружности кулачка O_1 . От прямой линии AO_1 откладываем угол $\beta_{\max} = 15^\circ$ (равный $\angle AO_3B$) и определяем высоту подъема толкателя на данном участке (поворот кулачка на 15° от точки A начала подъема толкателя). Значение угла β отсчитывают от радиуса O_1A . Угол β_{\max} расчетным путем определяется по формуле

$$\sin \beta_{\max} = \frac{a \cdot \sin \theta}{R_3 - R_2} = \frac{26 \sin 60^\circ}{90 - 4} = \frac{26 \cdot 0,866}{86} \approx 0,26.$$

Следовательно, величина угла β_{\max} равна 15° .

Высоту подъема плоского толкателя от точки A на выпуклом участке кулачка на 15° определим по формуле (первый участок) [12]

$$h_{1 \max} = (R_3 - R_1) \cdot (1 - \cos \beta_{1 \max}). \quad (3)$$

Расчет по формуле (3) для значений $R_3 = 90$ мм, $R_1 = 20$ мм, $\beta_{1 \max} = 15^\circ$ позволяет найти соответствующее значение $h_{1 \max}$

$$h_{1 \max} = (90 - 20) \cdot (1 - \cos 15^\circ) \approx \\ \approx 70 \cdot 0,034 = 2,38 \text{ мм.}$$

Отметим, что величина угла β изменяется от 0 до 15° . Обозначим E значение $R_3 - R_1 = 70$ мм ($E = 70$ мм).

С достаточной для практики точностью пренебрегаем малым расстоянием дуги BC , что компенсируем тем, что выпуклую часть кулачка проводим не до точки B , а до точки C . На данном втором участке максимальный угол

$$\beta_{2 \max} = \theta - \beta_{1 \max} = 60^\circ - 15^\circ = 45^\circ. \quad (4)$$

Начало отсчета (0°) угла β_2 производится от оси X (радиуса O_1C).

Высоту подъема плоского толкателя на втором участке при изменении угла от 45° до 0° определим из выражения [11]

$$h_2 = h_{\max} - a \cdot (1 - \cos \beta_{2 \max}). \quad (5)$$

Для $\beta_{2 \max} = 45^\circ$ по формуле (5) получим

$$h_2 = 10 - 26(1 - \cos 45^\circ) = \\ = 10 - 26(1 - 0,707) = 10 - 26 \cdot 0,293 = 2,38 \text{ мм.}$$

Высота подъема толкателя в конце первого участка (2,38 мм) и в самом начале подъема на втором участке (2,38 мм) равны друг другу, что говорит о правильном выборе расчетных формул.

При $\beta_2 = 0^\circ$ по формуле (5) $h_2 = h_{\max} = 10$ мм.

Значение h_2 при $\beta_2 = 40^\circ, 35^\circ, \dots, 5^\circ$ представлены в табл. 1.

Скорость толкателя является первой производной пути (хода) по времени. Для первого участка от точки A (от 0° до 15°) при скольжении по дуге радиуса R_3 скорость определяется выражением [10, с. 287]

$$\vartheta_1 = (R_3 - R_1) \cdot \omega_k \cdot \sin \beta_1, \quad (6)$$

где $R_3 = 90$ мм — радиус боковой дуги выпуклого кулачка; $R_1 = 20$ мм — радиус начальной окружности; ω_k — угловая скорость вращения вала кулачка (1/с), при частоте вращения вала кулачка 1000 мин^{-1} величина $\omega_k = 104,6 \text{ 1/с}$.

Для $\beta_{\max} = 15^\circ$ значение $\vartheta_1 = 1,89 \text{ м/с}$ по формуле (6).

Для второго участка при скольжении толкателя по дуге радиуса $R_3 = 90$ мм от начала второго участка до точки C скорость будет равна [10, с. 287]

$$\vartheta_2 = a \cdot \omega_k \cdot \sin \beta_2. \quad (7)$$

Для $a = 26$ мм, $\sin 45^\circ = 0,707$ величина $\vartheta_2 = -1,9 \text{ м/с}$. Угол от начала второго участка до точки C равен 45° . Расчеты по формулам (6) и (7) по-

Изменение хода, скорости и ускорения толкателя от кулачка выпуклого профиля

Участок 1				Участок 2			
$\beta_1, ^\circ$	$h_1, \text{мм}$	$\vartheta_1, \text{м/с}$	$j_1, \text{м/с}^2$	$\beta_2, ^\circ (\beta_{н'}, ^\circ)$	$h_2, \text{мм}$	$\vartheta_2, \text{м/с}$	$J_2, \text{м/с}^2$
0	0,00	0,00	765,88	45 (15)	2,38	1,92	-201,12
5	0,28	0,64	762,82	40 (20)	3,92	1,75	-217,90
10	1,05	1,27	754,39	35 (25)	5,29	1,56	-232,98
15	2,38	1,89	739,84	30 (30)	6,52	1,36	-246,35
				25 (35)	7,56	1,15	-257,73
				20 (40)	8,44	0,93	-267,40
				15 (45)	9,12	0,70	-274,80
				10 (50)	9,61	0,47	-280,20
				5 (55)	9,89	0,24	-283,33
				0 (60)	10,00	0,00	-284,47

($\beta_{н'}, ^\circ$) — угол поворота кулачкового вала относительно оси, в градусах

казывают, что скорость толкателя в конце первого (1,89 м/с) и, соответственно, в конце второго (при условии, что отсчет угла на втором участке идет от вертикальной оси) (1,92 м/с) участков примерно равны друг другу.

Ускорение плоского толкателя на первом участке при изменении угла поворота кулачка от 0° до 15° определим из выражения [11, 12]

$$j_1 = (R_3 - R_1) \cdot \omega_{2к} \cdot \cos \beta_1. \quad (8)$$

При $\beta_1 = 15^\circ$: $j_1 = (R_3 - R_1) \cdot \omega_{2к} \cdot \cos 15^\circ = 0,07 \cdot 104,6^2 \cdot 0,965 = 739,84 \text{ м/с}^2$.

При $\beta_1 = 0^\circ$: $j_1 = (R_3 - R_1) \cdot \omega_{2к} \cdot \cos 0^\circ = 0,07 \cdot 104,6^2 \cdot 1 = 765,88 \text{ м/с}^2$.

Ускорение толкателя на втором участке при изменении угла поворота кулачка от 45° до 0° определим из формулы

$$j_2 = -a \cdot \omega_{2к} \cdot \cos \beta_2 = -0,026 \cdot 104,6^2 \cdot \cos 45^\circ = -201 \text{ м/с}^2. \quad (9)$$

В табл. 1 представлены результаты расчета хода, скорости и ускорения толкателя для выпуклого кулачка на участках 1 и 2. По данным табл. 1 построены графики (рис. 3) хода (сплошная линия) и скорости (прерывистая линия) толкателя в зависимости от угла поворота вала для кулачка с выпуклым профилем. Покажем, каким образом могут быть реализованы приведенные выше расчеты с использованием программы Mathcad.

2. Расчет кулачка с выпуклым профилем с использованием программы Mathcad.

2.1. Исходные данные.

Дано:

$R_1 = 20 \text{ мм}$; $R_2 = 4 \text{ мм}$; $R_3 = 90 \text{ мм}$; $a = 26 \text{ мм}$;

$h_{1\text{max}} = 10 \text{ мм}$; $h_{\text{max}} = 10 \text{ мм}$; $\beta_{1\text{max}} = 15 \text{ град}$; $\beta_{2\text{max}} = 45 \text{ град}$; $\theta = 60 \text{ град}$;

$\pi = 3,142$; $\omega_{к} = 104,6 \text{ 1/с}$ — угловая скорость вращения вала кулачка;

$\text{deg} = \frac{\pi}{180} = 0,0174556$; $\cos(15\text{-deg}) = 0,996$; $R_3 - R_1 = 70$.

2.2. Расчет высоты подъема толкателя.

А. Подъем толкателя на первом участке AA_1

(рис. 2) при изменении угла поворота кулачка от 0° до 15°

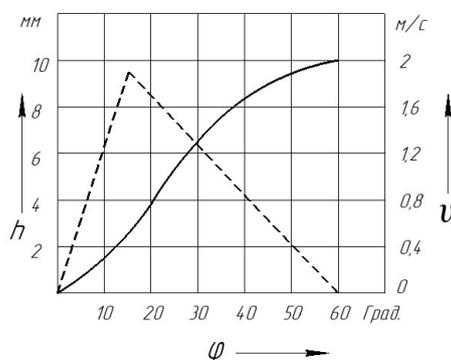


Рис. 3. Зависимость хода и скорости толкателя от частоты вращения кулачкового вала

$$h_{1\text{max}} = (R_3 - R_1) \cdot (1 - \cos(\beta_{1\text{max}} \cdot \text{deg})) = 2,386 \text{ мм}$$

$$\cos(5 \cdot \text{deg}) = 0,996$$

$$\beta_1 = 0, 5, \dots, 15$$

$$h_1(\beta_1) = (R_3 - R_1) \cdot (1 - \cos(\beta_1 \cdot \text{deg})) = 70 \cdot (1 - 0,996) = 0,280$$

$$\beta_1 = h_1(\beta_1) =$$

$$0 \quad 0$$

$$5 \quad 0,266$$

$$10 \quad 1,064$$

$$15 \quad 2,386$$

Для обобщения дальнейших расчетов перейдем к углу поворота кулачка

$$\varphi = 0, 5, \dots, 15.$$

$$\text{Обозначим } \beta_1 = \varphi \quad h_1(\varphi) = (R_3 - R_1) \cdot (1 - \cos(\varphi \cdot \text{deg}))$$

$$\varphi = h_1(\varphi) =$$

$$0 \quad 0$$

$$5 \quad 0,266$$

$$10 \quad 1,064$$

$$15 \quad 2,386$$

Б. Подъем толкателя на втором участке A_1A_1' при изменении угла поворота кулачка от 15° до 105°

$$\varphi = 15, 20, \dots, 60.$$

Переходим к углу поворота кулачка $\beta_2 = \theta - \varphi$

$$h_{\text{max}} = 10 \quad \theta = 60 \quad h_2(\varphi) = h_{\text{max}} - a[1 - \cos[(\theta - \varphi) \cdot \text{deg}]]$$

$$\varphi = h_2(\varphi) = \quad \varphi = h_2(\varphi) =$$

$$15 \quad 2,383 \quad 60 \quad 10$$

$$20 \quad 3,916 \quad 65 \quad 9,901$$

25	5,297	70	9,965
30	6,516	75	9,114
35	7,563	80	8,432
40	8,432	85	7,563
45	9,114	90	6,516
50	9,605	95	5,297
55	9,901	100	3,916
60	10	105	2,383

В. Подъем толкателя на третьем участке A_1A_1'

при изменении угла поворота кулачка от 105° до 120°

$$\varphi: = 105, 110, \dots 120 \quad \beta_3: = 2\theta - \varphi$$

$$h_3(\beta_3): = (R_3 - R_1) \cdot (1 - \cos(\beta_3 \cdot \text{deg}))$$

$$h_3(\varphi): = (R_3 - R_1) \cdot [1 - \cos[(2\theta - \varphi) \cdot \text{deg}]]$$

$$\varphi = h_3(\varphi) =$$

$$105 \quad 2,386$$

$$110 \quad 1,064$$

$$115 \quad 0,266$$

$$120 \quad 0$$

Пусть $\varphi: = 0 \dots 120$.

Объединение трех графиков подъема толкателя в один осуществляется с использованием программного модуля Add Line"

$$h(\varphi) := \begin{cases} h_1(\varphi) & \text{if } \varphi \geq 0 \leq 15 \\ h_2(\varphi) & \text{if } \varphi \geq 15 \leq 105 \\ h_3(\varphi) & \text{if } \varphi > 105 \leq 120 \end{cases}$$

На рис. 4 представлен график хода толкателя для выпуклого кулачка.

2.3. Расчет скорости толкателя.**А. Скорость толкателя на первом участке AA_1**

при изменении угла поворота кулачка от 0° до 15°

$$\varphi: = 0, 5, \dots 15.$$

$$v_1(\varphi): = 10^{-3} \cdot (R_3 - R_1) \cdot \omega_k \cdot \sin(\varphi \cdot \text{deg})$$

$$\varphi = v_1(\varphi) =$$

$$0 \quad 0$$

$$5 \quad 0,638$$

$$10 \quad 1,272$$

$$15 \quad 1,895$$

Б. Скорость толкателя на втором участке A_1A_1'

при изменении угла поворота кулачка от 15° до 105°

$$\varphi: = 15, 20, \dots 60.$$

Переходим к углу поворота кулачка $\beta_2: = \theta - \varphi$

$$v_2(\varphi): = 10^{-3} \cdot a \cdot \omega_k \cdot \sin[(\theta - \varphi) \cdot \text{deg}]$$

$$\varphi = v_2(\varphi) = \quad \varphi = \quad v_2(\varphi) =$$

$$15 \quad 1,923 \quad 60 \quad 0$$

$$20 \quad 1,748 \quad 65 \quad -0,237$$

$$25 \quad 1,56 \quad 70 \quad -0,427$$

$$30 \quad 1,36 \quad 75 \quad -0,704$$

$$35 \quad 1,149 \quad 80 \quad -0,93$$

$$40 \quad 0,93 \quad 85 \quad -1,149$$

$$45 \quad 0,704 \quad 90 \quad -1,36$$

$$50 \quad 0,472 \quad 95 \quad -1,56$$

$$55 \quad 0,237 \quad 100 \quad -1,748$$

$$60 \quad 0 \quad 105 \quad -1,923$$

В. Скорость толкателя на третьем участке A_1A_1'

при изменении угла поворота кулачка от 105° до 120°

$$\varphi: = 105, 110, \dots 120 \quad \beta_3: = 2\theta - \varphi$$

$$v_3(\beta_3): = -10^{-3} \cdot (R_3 - R_1) \cdot \omega_k \cdot \sin(\beta_3 \cdot \text{deg})$$

$$v_3(\varphi): = -10^{-3} \cdot (R_3 - R_1) \cdot \omega_k \cdot \sin[(2\theta - \varphi) \cdot \text{deg}]$$

$$\varphi = v_3(\varphi) =$$

$$105 \quad -1,895$$

$$110 \quad -1,272$$

$$115 \quad -0,638$$

$$120 \quad 0$$

Пусть $\varphi: = 0 \dots 120$, тогда

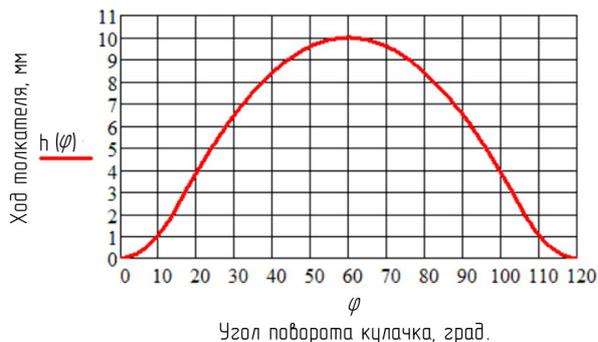


Рис. 4. Кривая пути толкателя кулачка с выпуклым профилем

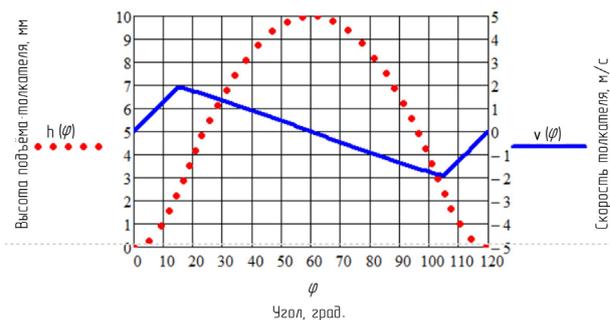


Рис. 5. Совмещенные графики пути и скорости толкателя кулачка с выпуклым профилем

$$v(\varphi) := \begin{cases} v_1(\varphi) & \text{if } \varphi \geq 0 \leq 15 \\ v_2(\varphi) & \text{if } \varphi \geq 15 \leq 105 \\ v_3(\varphi) & \text{if } \varphi \geq 105 \leq 120 \end{cases}$$

На рис. 5 представлены совмещенные графики **высоты** подъема и скорости толкателя кулачка с выпуклым профилем, построенные с помощью Mathcad.

2.4. Расчет ускорения толкателя.**А. Ускорение толкателя на первом участке AA_1**

при изменении угла поворота кулачка от 0° до 15°

$$\varphi: = 0, 5, \dots 15.$$

$$j_1(\varphi): = 10^{-3} \cdot (R_3 - R_1) \cdot \omega_k^2 \cdot \cos(\varphi \cdot \text{deg})$$

$$\varphi = j_1(\varphi) =$$

$$0 \quad 765,881$$

$$5 \quad 762,966$$

$$10 \quad 754,243$$

$$15 \quad 739,778$$

Б. Ускорение толкателя на втором участке A_1A_1'

при изменении угла поворота кулачка от 15° до 105°

$$\varphi: = 15, 20, \dots 60 \quad \beta_2: = \theta - \varphi \quad a = 26$$

$$j_2(\varphi): = -10^{-3} \cdot a \cdot \omega_k^2 \cdot \cos[(\theta - \varphi) \cdot \text{deg}]$$

$$\varphi = j_2(\varphi) =$$

$$15 \quad -201,13$$

$$20 \quad -217,9$$

$$25 \quad -233,011$$

$$30 \quad -246,349$$

$$35 \quad -257,811$$

$$40 \quad -267,31$$

$$45 \quad -274,775$$

$$50 \quad -280,147$$

$$55 \quad -283,387$$

$$60 \quad -284,47$$

В. Ускорение толкателя на третьем участке A_1A_1'

при изменении угла поворота кулачка от 105° до 120°

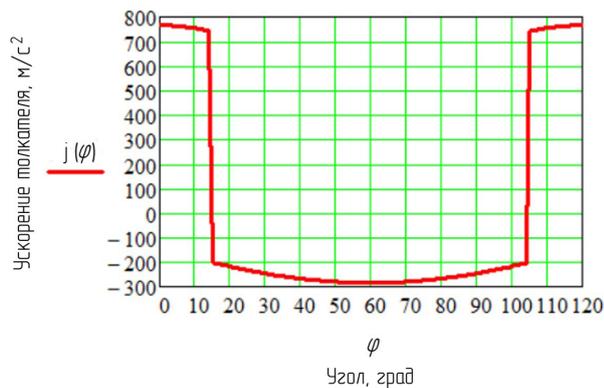


Рис. 6. Кривая ускорения толкателя кулачка с выпуклым профилем

$$\begin{aligned} \varphi &= 105, 110, \dots, 120 & \beta_3 &= 2\theta - \varphi \\ j_3(\beta_3) &= 10^{-3} \cdot (R_3 - R_1) \cdot \omega_k^2 \cdot \cos(\beta_3 \cdot \text{deg}) \\ j_3(\varphi) &= 10^{-3} \cdot (R_3 - R_1) \cdot \omega_k^2 \cdot \cos[(2\theta - \varphi) \cdot \text{deg}] \\ \varphi &= & j_3(\varphi) &= \\ 105 & & 739,778 \\ 110 & & 754,243 \\ 115 & & 762,966 \\ 120 & & 765,881 \end{aligned}$$

Пусть $\varphi = 0 \dots 120$, тогда

$$j(\varphi) := \begin{cases} j_1(\varphi) & \text{if } \varphi \geq 0 \leq 15 \\ j_2(\varphi) & \text{if } \varphi \geq 15 \leq 105. \\ j_3(\varphi) & \text{if } \varphi \geq 105 \leq 120 \end{cases}$$

На рис. 6 представлен график ускорения толкателя для кулачка с выпуклым профилем.

Выводы

1. Приведены особенности построения кулачка с выпуклым профилем для заданного максимального хода толкателя, дана методика кинематического расчета толкателя при его движении по выпуклой и закругленной поверхности.
2. Предложена методика, позволяющая определить положение центра радиуса выпуклой поверхности кулачка.
3. Выполнен кинематический расчет кулачка выпуклого профиля и построены графики изменения высоты подъема, скорости и ускорения толкателя в системе Mathcad.
4. Результаты кинематического расчета кулачка выпуклого профиля по заданным размерам позволят проектировать копиры, необходимые для обработки кулачковых валов.

Библиографический список

1. Prasad R. D. V., Satyanarayana K., Maheswara Ch. [et al.]. Analysis of Cam and Follower Mechanism to Reduce Jerk and Induced Stresses // Journal of Recent Trends in Mechanics. 2020. Vol. 5 (3). P. 8–17. DOI: 10.46610/JoRTM.2020.v05i03.002.
2. Ghosh A. Kinematic Analysis of Different Shedding Cams Used in Weaving Looms // Industrial Engineering Journal. 2019. Vol. 12 (12). DOI: 10.26488/IEJ.12.12.1201.
3. Yousuf L. S., Hadi N. H. Contact Stress Distribution of a Pear Cam Profile with Roller Follower Mechanism // Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2021. Vol. 34 (24). DOI: 10.1186/s10033-021-00533-y.
4. Гринев Д. В., Донченко М. А., Журавлев Ю. Н. [и др.]. Кинематический анализ рычажно-кулачкового механизма преобразования движения для роторно-лопастного двигателя с внешним подводом тепла // Технологии и технические

средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2008. № 80. С. 247–255.

5. Васильев А. В. Повышение эффективности и надежности работы дизельного двигателя путем профилирования динамически настроенных кулачков // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 10: Инновационная деятельность. 2014. № 4 (13). С. 79–85. DOI: 10.15688/jvolsu10.2014.4.9.

6. Эльяш Н. Н. Аналитический метод проектирования кулачковых механизмов с применением компьютерных технологий // Научно-технический вестник: Технические системы в АПК. 2019. № 4 (4). С. 31–39.

7. Понятский В. М., Романов А. В. Автоматизация исследования динамики 3D-моделей оптико-механических систем с использованием среды Matlab // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2020. Т. 16, № 1. С. 139–151. DOI: 10.25559/SITITO.16.202001.139-151.

8. Макушев Ю. П., Полякова Т. А., Быков П. С. [и др.] Графическое и расчетное определение высоты подъема и скорости толкателя тангенциального кулачка // Образование. Транспорт. Инновации. Строительство: сб. материалов IV Нац. науч.-практ. конф., 22–23 апр. 2021 г. Омск: Изд-во СибАДИ, 2021. С. 195–201.

9. Макушев Ю. П., Полякова Т. А., Волкова Л. Ю., Рындин В. В. Кинематический расчет и построение графиков высоты подъема и скорости толкателя тангенциальных кулачков с использованием программы MATHCAD // Омский научный вестник. 2021. № 4 (178). С. 5–11. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-178-5-11.

10. Колчин А. И., Демидов В. П. Расчет автомобильных и тракторных двигателей. Москва: Высшая школа, 2008. 496 с.

11. Железко Б. Е., Адамов В. М., Русецкий И. К. [и др.]. Расчет и конструирование автомобильных и тракторных двигателей (дипломное проектирование). Минск: Высшая школа, 1987. 247 с.

12. Дизели. Справочник / Под ред. В. А. Ваншейдта. Москва: Машиностроение, 1964. 600 с.

ПОЛЯКОВА Татьяна Анатольевна, кандидат педагогических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Физика и математика» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ), г. Омск.

SPIN-код: 4090-8339

AuthorID (РИНЦ): 652910

ORCID: 0000-0002-9673-1750

Адрес для переписки: ta_polyakova@mail.ru

МАКУШЕВ Юрий Петрович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Тепловые двигатели и автотракторное электрооборудование», СибАДИ, г. Омск.

SPIN-код: 4777-2831

AuthorID (РИНЦ): 650763

Адрес для переписки: makushev321@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.



SPIN-код: 1687-9720
AuthorID (РИНЦ): 929600
Адрес для переписки: rvladvit@yandex.kz

ля с использованием программы Mathcad // Омский научный
вестник. 2021. № 5 (179). С. 34–40. DOI: 10.25206/1813-8225-
2021-179-34-40.

Для цитирования

Полякова Т. А., Макушев Ю. П., Волкова Л. Ю., Рын-
дин В. В. Кинематический расчет кулачков выпуклого профи-

Статья поступила в редакцию 11.09.2021 г.

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