И. Нейман

Динамика авиационных двигателей

Москва
«Книга по Требованию»

УДК 656
ББК 39.1
И11

И. Нейман
И11 Динамика авиационных двигателей / И. Нейман – М.: Книга по Требованию, 2024. – 489 с.

ISBN 978-5-458-38303-5

ISBN 978-5-458-38303-5

ЧАСТЬ I

КИНЕМАТИКА КРИВОШИПНО-ШАТУННЫХ МЕХАНИЗМОВ

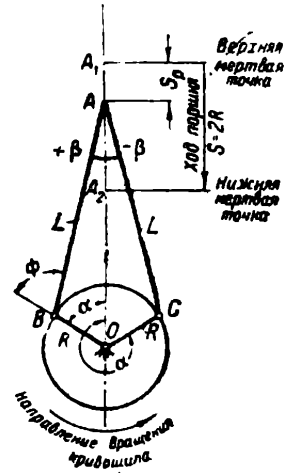
Глава I

КИНЕМАТИКА НОРМАЛЬНОГО КРИВОШИПНО-ШАТУННОГО МЕХАНИЗМА

§ 1. Основные понятия и обозначения

Нормальным кривошипно-шатунным механизмом называется такой, в котором ось цилиндра пересекает ось коленчатого вала. Схема этого механизма дана на фиг. 1. Координация всех кинематических и динамических процессов в кривошипно-шатунном механизме ведется по углу поворота кривошипа α. Угол α отсчитывается от некоторого начального положения кривошипа; за последнее в дальнейшем принимаем то положение кривошипа, при котором он совпадает с осью цилиндра, как это показано на фиг. 1.

Обычно считают, что угловая скорость вращения кривошипа ω постоянна и угол α изменяется пропорционально времени. Однако при рассмотрении некоторых специальных вопросов динамики двигателя, как, например, крутильных колебаний коленчатого вала, приходится учитывать, что угловая скорость ω является величиной переменной. В последующем изложении, если не будет специальных оговорок, скорость ω принимается величиной постоянной.



Фиг. 1. Нормальный кривошипно-шатунный механизм.

Введем следующие обозначения:

R — радиус кривошипа;

L — длина шатуна;

λ — отношение длины радиуса кривошипа к длине шатуна;

α — угол поворота кривошипа от его начального положения; угол α меняется от 0 до 360°;

β — угол отклонения оси шатуна от оси цилиндра; угол β положителен, когда шатун отклонен от оси цилиндра в направлении вращения вала мотора; при положении шатуна по другую сторону оси цилиндра угол β отрицателен;

S_p — расстояние оси поршневого пальца от ее верхнего мертвого положения;

v_p — скорость поршня;

j_p — ускорение поршня;

ω — угловая скорость вращения кривошипа;

n — число оборотов вала мотора в минуту;

t — время поворота кривошипа от его начального положения;

$(v_p)_{cp}$ — средняя скорость поршня;

Φ — угол отклонения оси шатуна от плоскости кривошипа;

ω_l — угловая скорость вращения шатуна;

ε_l — угловое ускорение шатуна.

§ 2. Угловые перемещение, скорость и ускорение шатуна

Угловая скорость вращения кривошипа будет

$$\frac{\pi}{30} n = \text{const}. \tag{1}$$

Угол поворота кривошипа от начального положения будет

$$\alpha = \omega t. \tag{2}$$

Из фиг. 1 мы имеем

$$\frac{\sin\beta}{\sin\alpha} = \frac{R}{L} = \lambda \tag{3}$$

или

$$\sin\beta = \lambda \sin\alpha. \tag{4}$$

Тогда угловое перемещение шатуна равно

$$\beta = \arcsin(\lambda \sin\alpha). \tag{5}$$

Максимальные углы отклонения шатуна от оси цилиндра получаются при

$$\alpha = 90^\circ \text{ и } \alpha = 270^\circ$$

и определяются из уравнения

$$\sin(\beta_{max}) = \pm\lambda. \tag{6}$$

Угловая скорость шатуна будет

$$\omega_L = \frac{d\beta}{dt} = \lambda\omega \frac{\cos\alpha}{\cos\beta}. \tag{7}$$

Максимальные значения ω_L получаются при

$$\alpha = 0 \text{ и } \alpha = 180^\circ$$

и будут равны

$$(\omega_L)_{max} = \pm\lambda\omega. \tag{8}$$

Нулевые значения угловой скорости шатуна

$$\omega_L = 0$$

будут при

$$\alpha = 90^\circ \text{ и } \alpha = 270^\circ,$$

т. е. в моменты максимальных отклонений шатуна в ту или другую сторону от оси цилиндра.

Угловое ускорение шатуна будет

$$\Theta_L = \frac{d\omega_L}{dt} = \frac{d^2\beta}{dt^2} = \lambda\omega \frac{d\left(\frac{\cos\alpha}{\cos\beta}\right)}{dt} = \lambda\omega \frac{-\sin\alpha \frac{d\alpha}{dt}\cos\beta + \sin\beta \frac{d\beta}{dt}\cos\alpha}{\cos^2\beta} =$$

$$= \frac{\lambda\omega}{\cos^2\beta}\left(-\omega\sin\alpha\cos\beta + \lambda\omega\sin\beta\cos\alpha\frac{\cos\alpha}{\cos\beta}\right) = \lambda\omega^2\frac{\sin\alpha}{\cos^3\beta}(-\cos^2\beta + \lambda^2\cos^2\alpha) =$$

$$= \lambda\omega^2\frac{\sin\alpha}{\cos^3\beta}(-1 + \lambda^2\sin^2\alpha + \lambda^2 - \lambda^2\sin^2\alpha) = -\lambda(1-\lambda^2)\omega^2\frac{\sin\alpha}{\cos^3\beta}.$$

$$\Theta_L = -\lambda(1-\lambda^2)\omega^2\frac{\sin\alpha}{\cos^3\beta}. \tag{9}$$

Максимальные значения Θ_L получаются при

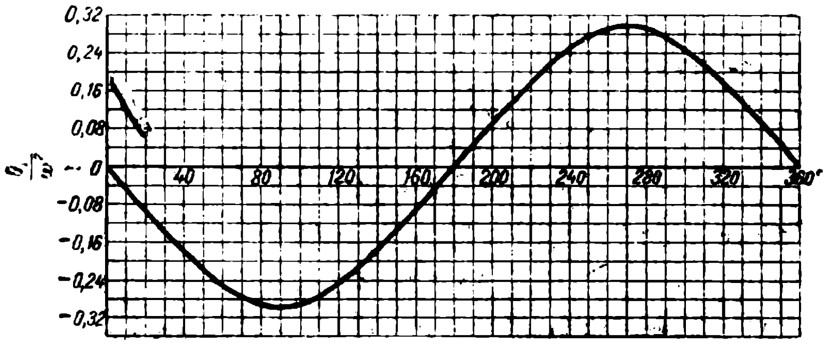
$$\alpha = 90^\circ \text{ и } \alpha = 270^\circ,$$

т. е. в моменты максимальных отклонений шатуна от оси цилиндра. При указанных значениях угла α функция $\sin\alpha$ принимает по абсолютной величине свое максимальное значение 1, а $\cos\beta$ — свое минимальное значе-

...ние $1 - \lambda^2$; следовательно, дробь $\frac{\sin\alpha}{\cos^3\beta}$ принимает свое максимальное значение, а Θ_L — свое максимальное значение $(\Theta_L)_{max}$.

Имеем

$$(\Theta_L)_{max} = \mp \frac{\lambda}{\sqrt{1-\lambda^2}}\omega^2. \tag{10}$$



Фиг. 2. Протекание функции $\frac{\Theta_L}{\omega^2}$ для $\lambda = \frac{1}{3,5}$

Значения $\Theta_L = 0$ получаются при

$$\alpha = 0° \text{ и } \alpha = 180°,$$

т. е. в моменты совпадения оси шатуна с осью цилиндра.

На фиг. 2 дан закон протекания по углу поворота кривошипа α функции $\frac{\Theta_L}{\omega^2}$ для $\lambda = \frac{1}{3,5}$

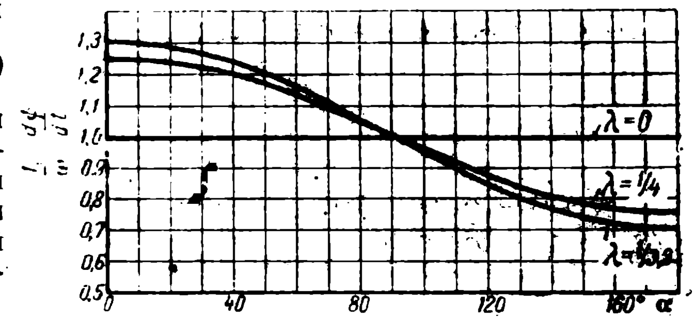
§ 3. Относительная угловая скорость вращения шатуна вокруг шатунной шейки коленчатого вала

Согласно фиг. 1 имеем

$$\Phi = \alpha + \beta. \tag{11}$$

Отсюда, диференцируя это уравнение по t, получим для относительной угловой скорости вращения шатуна вокруг шатунной шейки коленчатого вала выражение

$$\frac{d\Phi}{dt} = \omega\left(1 + \lambda\frac{\cos\alpha}{\cos\beta}\right) \tag{12}$$



Фиг. 3. Протекание функции $\frac{1}{\omega}\frac{d\Phi}{dt}$ для $\lambda = \frac{1}{3,3}$, $\lambda = \frac{1}{4,0}$ и $\lambda = 0$.

На фиг. 3 даны кривые $\frac{1}{\omega}\cdot\frac{d\Phi}{dt}$ как функции угла поворота α для $\lambda = \frac{1}{3,3}$, $\lambda = \frac{1}{4}$ и $\lambda = 0$.

§ 4. Расстояние поршня от верхнего мертвого положения

Из фиг. 1 имеем

$$S_p = (R + L) - (R\cos\alpha + L\cos\beta), \tag{13}$$

но

$$\cos\beta = \sqrt{1-\sin^2\beta} = \sqrt{1-\lambda^2\sin^2\alpha}, \tag{14}$$

следовательно,

$$S_p = (R + L) - R\left(\cos\alpha + \frac{1}{\lambda}\sqrt{1-\lambda^2\sin^2\alpha}\right) \tag{15}$$

Разлагая выражение $\sqrt{1-\lambda^2\sin^2\alpha}$ в ряд по биному Ньютона, будем иметь

$$\sqrt{1-\lambda^2\sin^2\alpha} = 1 - \frac{1}{2}\lambda^2\sin^2\alpha - \frac{1}{2\cdot 4}\lambda^4\sin^4\alpha -$$

$$-\frac{1\cdot 3}{2\cdot 4\cdot 6}\lambda^6\sin^6\alpha - \frac{1\cdot 3\cdot 5}{2\cdot 4\cdot 6\cdot 8}\lambda^8\sin^8\alpha \tag{16}$$

Так как при n четном имеет место соотношение

$$\sin^n\alpha = \frac{1}{2^{n-1}i^n}\Big[\cos n\alpha - (n)_1\cos(n-2)\alpha + (n)_2\cos(n-4)\alpha - \ldots +$$

$$+(-1)^{\frac{n-4}{2}}(n)_{\frac{n-4}{2}}\cos 4\alpha + (-1)^{\frac{n-2}{2}}(n)_{\frac{n-2}{2}}\cos 2\alpha\Big] + (-1)^{\frac{n}{2}}(n)_{\frac{n}{2}}\left(\frac{1}{2^n i^n}\right), \tag{17}$$

где

$$(n)_p = \frac{n(n-1)(n-2)\ldots[n-(p-1)]}{1\cdot 2\cdot 3\ldots p}, \tag{18}$$

то

$$\left.\begin{aligned}
\sin^2\alpha &= \frac{1}{2}(1-\cos 2\alpha),\\
\sin^4\alpha &= \frac{1}{8}(\cos 4\alpha - 4\cos 2\alpha + 3),\\
\sin^6\alpha &= -\frac{1}{32}(\cos 6\alpha - 6\cos 4\alpha + 15\cos 2\alpha - 10),\\
\sin^8\alpha &= \frac{1}{128}(\cos 8\alpha - 8\cos 6\alpha + 28\cos 4\alpha - 56\cos 2\alpha + 35),
\end{aligned}\right\} \tag{19}$$

и

$$\begin{aligned}
\sqrt{1-\lambda^2\sin^2\alpha} = 1 &- \left(\frac{1}{4}\lambda^2 + \frac{3}{64}\lambda^4 + \frac{5}{256}\lambda^6 + \frac{175}{128^2}\lambda^8 + \ldots\right) +\\
&+ \left(\frac{1}{4}\lambda^2 + \frac{1}{16}\lambda^4 + \frac{15}{512}\lambda^6 + \frac{35}{2048}\lambda^8 + \ldots\right)\cos 2\alpha -\\
&- \left(\frac{1}{64}\lambda^4 + \frac{3}{256}\lambda^6 + \frac{35}{4096}\lambda^8 + \ldots\right)\cos 4\alpha +\\
&+ \left(\frac{1}{512}\lambda^6 + \frac{5}{2048}\lambda^8 + \ldots\right)\cos 6\alpha -\\
&- \left(\frac{5}{128^2}\lambda^8 + \ldots\right)\cos 8\alpha + \ldots
\end{aligned} \tag{20}$$

Обозначив

$$\left.\begin{aligned}
k &= \frac{1}{4}\lambda + \frac{3}{64}\lambda^3 + \frac{5}{256}\lambda^5 + \frac{175}{128^2}\lambda^7 + \ldots,\\
\rho_2 &= \frac{1}{4}\lambda + \frac{1}{16}\lambda^3 + \frac{15}{512}\lambda^5 + \frac{35}{2048}\lambda^7 + \ldots\\
\rho_4 &= \frac{1}{64}\lambda^3 + \frac{3}{256}\lambda^5 + \frac{35}{4096}\lambda^7 + \ldots,\\
\rho_6 &= \frac{1}{512}\lambda^5 + \frac{5}{2048}\lambda^7 + \ldots\\
\rho_8 &= \frac{5}{128^2}\lambda^7 + \ldots
\end{aligned}\right| \tag{21}$$

будем иметь

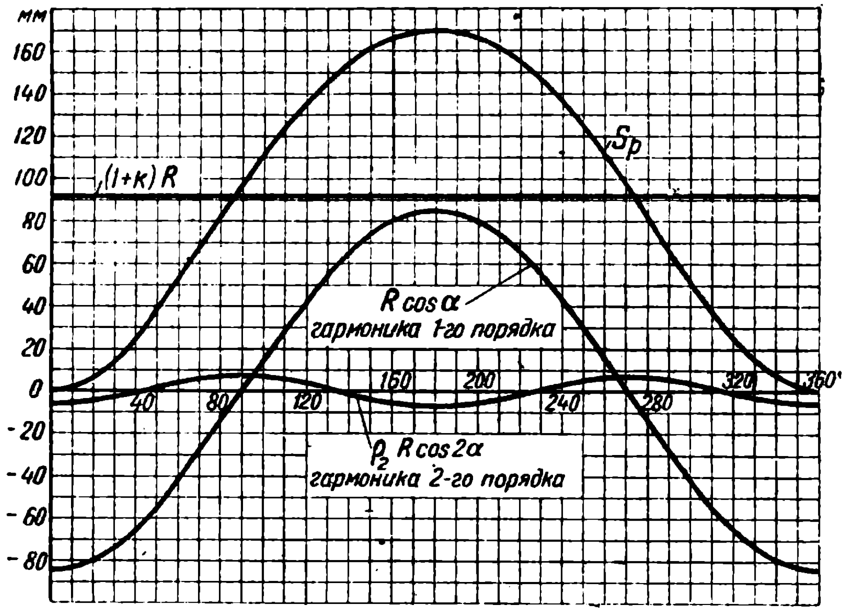
$$\frac{1}{\lambda}\sqrt{1-\lambda^2\sin^2\alpha} = \frac{1}{\lambda} - k + \rho_2\cos 2\alpha - \rho_4\cos 4\alpha + \rho_6\cos 6\alpha -$$

$$-\rho_8\cos 8\alpha + \ldots \tag{22}$$

и

$$S_p = (R+L) - R\left(\cos\alpha + \frac{1}{\lambda} - k + \rho_2\cos 2\alpha - \rho_4\cos 4\alpha + \right.$$
$$\left. + \rho_6\cos 6\alpha - \rho_8\cos 8\alpha + \ldots\right) = R(1+k) - R(\cos\alpha +$$
$$+ \rho_2\cos 2\alpha - \rho_4\cos 4\alpha + \rho_6\cos 6\alpha - \rho_8\cos 8\alpha + \ldots). \quad (23)$$

В табл. 1 приведены числовые значения коэфициентов k, ρ_2, ρ_4, ρ_6 и ρ_8 для различных λ, вычисленные в предположении, что разложение по биному Ньютона выражения $\sqrt{1-\lambda^2\sin^2\alpha}$ [равенство (16)] ограничено членом, содержащим $\sin^8\alpha$.



Фиг. 4. Кривая пути поршня по углу поворота кривошипа и гармоники, ее составляющие, для $R = 8{,}5$ *см* и $\lambda = \frac{1}{3{,}4}$.

Как видно из табл. 1, амплитуды гармоник функции S_p [равенство (23)] быстро уменьшаются с увеличением порядка гармоники. Так, например, для $\lambda = \frac{1}{3{,}4}$ амплитуда гармоники 4-го порядка составляет только 0,042% амплитуды гармоники 1-го порядка. Поэтому с достаточной для практики точностью расстояние поршня от верхнего мертвого положения S_p определяется из уравнения

$$S_p = R\left[\left(1 + \frac{\lambda}{4}\right) - \left(\cos\alpha + \frac{\lambda}{4}\cos 2\alpha\right)\right]. \quad (24)$$

На фиг. 4 даны кривая пути поршня по углу поворота кривошипа и гармоники этой кривой согласно ряду Фурье [равенство (23)] для иллюстрации их влияния на величину пути. Кривые построены для

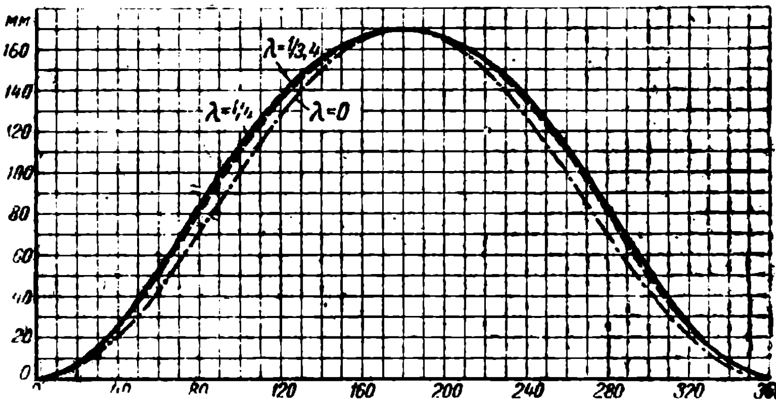
$$R = 8{,}5 \text{ см} \quad \text{и} \quad \lambda = \frac{1}{3{,}4}.$$

Выражение (23) для S_p в виде ряда Фурье потребуется нам ниже для получения в форме ряда Фурье ускорения поршня. Как увидим дальше, такая форма выражения для ускорения поршня играет важную роль в вопросах динамики двигателя.

Таблица 1

Значения коэфициентов k, ρ_2, ρ_4, ρ_6 и ρ_8 для различных λ

λ	k	ρ_2	ρ_4	ρ_6	ρ_8
$\frac{1}{3,4}$	0,0747	0,0753	0,000424	0,00000501	0,0000000582
$\frac{1}{3,5}$	725	729	388	417	475
$\frac{1}{3,6}$	704	708	355	352	366
$\frac{1}{3,7}$	686	689	326	307	322
$\frac{1}{3,8}$	667	670	301	267	267
$\frac{1}{3,9}$	649	652	277	234	222
$\frac{1}{4,0}$	632	635	256	205	186



Фиг. 5. Кривые пути поршня по углу поворота кривошипа для $\lambda = \frac{1}{3,4}$, $\lambda = \frac{1}{4,0}$ и $\lambda = 0$ при $R = 8,5$ *см*.

На фиг. 5 даны для сравнения кривые S_p для

$$\lambda = \frac{1}{3,4}, \quad \lambda = \frac{1}{4,0} \quad \text{и} \quad \lambda = 0.$$

§ 5. Скорость поршня

Скорость поршня v_p будет

$$v_p = \frac{dS_p}{dt} = \omega \frac{dS_p}{d\alpha}. \tag{25}$$

Подставляя в это равенство значение S_p из уравнения (13), получим точное выражение для v_p в виде

$$v_p = \omega\left(R\sin\alpha + l\sin\beta\frac{d\beta}{d\alpha}\right) = \omega\left(R\sin\alpha + L\sin\beta\lambda\frac{\cos\alpha}{\cos\beta}\right) =$$

$$= R\omega\left(\sin\alpha + \frac{\lambda}{2\cos\beta}\sin 2\alpha\right),$$

$$v_p = R\omega\left(\sin\alpha + \frac{\lambda}{2\cos\beta}\sin 2\alpha\right). \tag{26}$$

Другое точное выражение для скорости поршня получим преобразованием соотношения (26). Имеем

$$v_p = R\omega\left(\sin\alpha + \frac{\lambda}{2\cos\beta}\sin 2\alpha\right) =$$

$$= R\omega\left(\sin\alpha + \frac{1}{\cos\beta}\lambda\sin\alpha\cos\alpha\right) =$$

$$= \frac{R\omega}{\cos\beta}(\sin\alpha\cos\beta + \sin\beta\cos\alpha) =$$

$$= R\omega\cdot\frac{\sin(\alpha+\beta)}{\cos\beta}.$$

$$v_p = R\omega\frac{\sin(\alpha+\beta)}{\cos\beta}. \qquad (27)$$

Подставляя в равенство (25) выражение для S_p из равенства (23), будем иметь выражение для v_p в виде ряда Фурье

$$v_p = \frac{dS_p}{dt} = R\omega(\sin\alpha + 2\rho_2\sin 2\alpha - 4\rho_4\sin 4\alpha + 6\rho_6\sin 6\alpha - 8\rho_8\sin 8\alpha + - \ldots). \qquad (28)$$

В табл. 2 приведены численные значения коэфициентов $2\rho_2$, $4\rho_4$, $6\rho_6$ и $8\rho_8$ для различных λ.

На фиг. 6 даны для примера кривая скорости поршня по углу поворота кривошипа α и гармоники этой кривой согласно ряду Фурье [равенство (28)] для выявления их влияния на величину скорости.

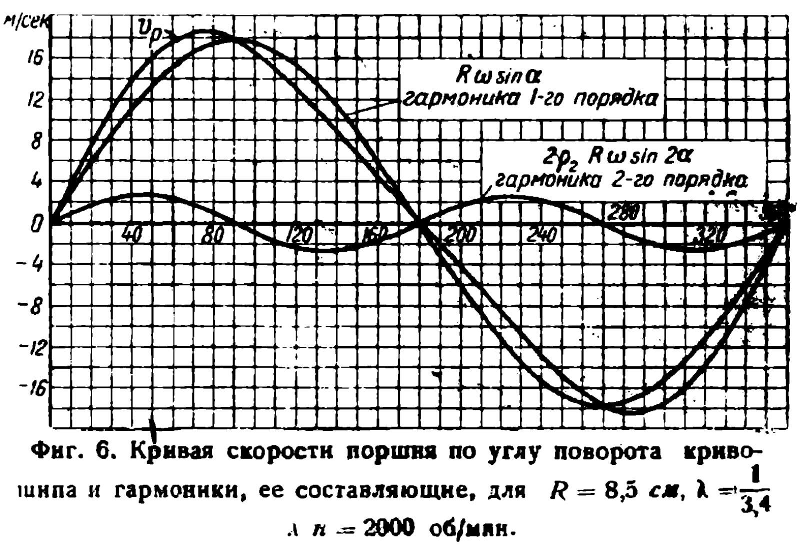
С достаточной для практики точностью скорость поршня определится из равенства

Таблица 2

Значения коэфициентов $2\rho_2$, $4\rho_4$, $6\rho_6$ и $8\rho_8$ для различных λ

λ	$2\rho_2$	$4\rho_4$	$6\rho_6$	$8\rho_8$
$\frac{1}{3,4}$	0,1506	0,00170	0,0000301	[illegible]
$\frac{1}{3,5}$	1458	155	250	[illegible]
$\frac{1}{3,6}$	1416	142	211	293
$\frac{1}{3,7}$	[illegible]	130	184	258
$\frac{1}{3,8}$	1340	120	160	214
$\frac{1}{3,9}$	1304	111	140	178
$\frac{1}{4,0}$	1270	102	[illegible]	149

$$v_p = R\omega\left(\sin\alpha + \frac{\lambda}{2}\sin 2\alpha\right). \qquad (29)$$



Фиг. 6. Кривая скорости поршня по углу поворота кривошипа и гармоники, ее составляющие, для $R = 8{,}5$ *см*, $\lambda = \frac{1}{3{,}4}$ и $n = 2000$ об/мин.

Средняя скорость поршня определяется из уравнения

$$(v_p)_{cp} = \frac{2Rn}{30} = \frac{2}{\pi} R\omega. \tag{30}$$

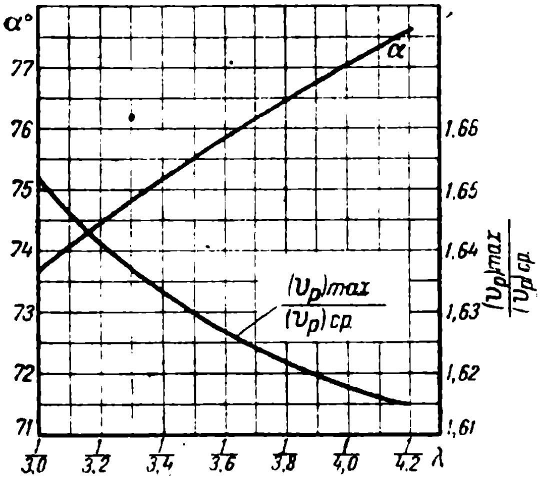
Отсюда скорость поршня может быть выражена в виде

$$v_p = \frac{\pi}{2}\left(\sin\alpha + \frac{\lambda}{2}\sin 2\alpha\right)(v_p)_{cp}. \tag{31}$$

Значение угла α, при котором скорость поршня имеет максимальное значение, найдется из уравнения

$$\frac{dv_p}{d\alpha} = 0.$$

Это значение угла α с практически достаточной точностью определится, если для v_p взять приближенное выражение (29). Имеем



Фиг. 7. Кривые изменения угла α, соответствующего моменту $(v_p)_{max}$ и отношения $\frac{(v_p)_{max}}{(v_p)_{cp}}$ в зависимости от λ.

$$\frac{dv_p}{d\alpha} = R\omega(\cos\alpha + \lambda\cos 2\alpha) = 0$$

или

$$\cos\alpha + \lambda\cos 2\alpha = 0,$$

$$\cos\alpha + \lambda(2\cos^2\alpha - 1) = 0,$$

$$\cos^2\alpha + \frac{1}{2\lambda}\cos\alpha - \frac{1}{2} = 0,$$

откуда

$$\cos\alpha = \frac{1}{4\lambda}\left(\sqrt{1 + 8\lambda^2} - 1\right). \tag{32}$$

Знак перед корнем берется положительным потому, что в противном случае, при обычных для двигателей численных значений λ, $\cos\alpha$ получился бы по абсолютной величине больше 1.

В табл. 3 даны для различных λ те углы $\alpha = \alpha_1$, при которых скорость поршня максимальна, а также приведены соответствующие значения отношения

$$\frac{(v_p)_{max}}{(v_p)_{cp}} = \frac{\pi}{2}\left(\sin\alpha_1 + \frac{\lambda}{2}\sin 2\alpha_1\right). \tag{33}$$

Таблица 3

Значения α_1 и $\frac{(v_p)_{max}}{(v_p)_{cp}}$ для различных λ

λ	$\frac{1}{3,4}$	$\frac{1}{3,5}$	$\frac{1}{3,6}$	$\frac{1}{3,7}$	$\frac{1}{3,8}$	$\frac{1}{3,9}$	$\frac{1}{4,0}$
	75° 10′	75° 33′	75° 50′	76° 09′	76° 26′	76° 46′	77°
$\frac{(v_p)_{max}}{(v_p)_{cp}}$	1,631	1,629	1,626	1,624	1,622	1,620	1,617

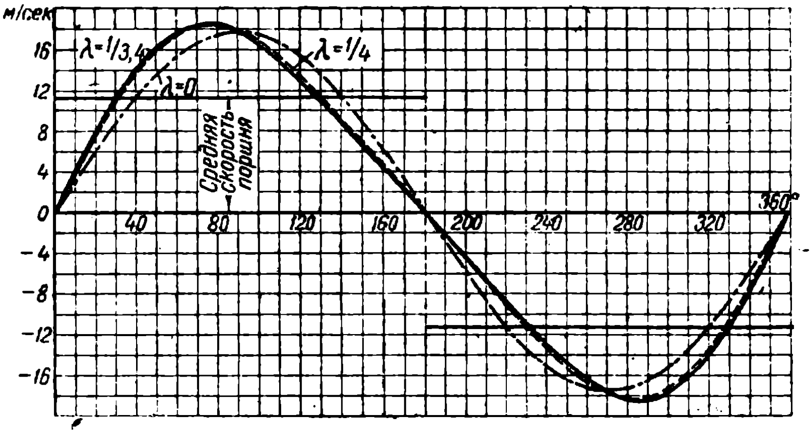
На фиг. 7 даны соответствующие графики этих величин как функции λ.

Скорость поршня будет равна нулю в мертвых точках поршня. Соответствующие значения α будут

$$\alpha = 0° \text{ и } \alpha = 180°.$$

На фиг. 8 даны для сравнения кривые скоростей поршня для

$$\lambda = \frac{1}{3{,}4},\ \lambda = \frac{1}{4{,}0}\ \text{и}\ \lambda = 0.$$



Фиг. 8. Кривые скоростей поршня для $\lambda = \frac{1}{3{,}4}$, $= \frac{1}{4{,}0}$ и $\lambda = 0$.

§ 6. Ускорение поршня

Ускорение поршня j_p будет

$$j_p = \frac{dv_p}{dt} = \omega \frac{dv_p}{d\alpha}. \tag{34}$$

Подставляя в это равенство выражение для v_p из равенства (27)

$$v_p = R\omega \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\cos\beta}$$

получим точное выражение для j_p в следующем виде:

$$j_p = R\omega^2 \left[\frac{\cos(\alpha+\beta)\left(1 + \frac{d\beta}{d\alpha}\right)\cos\beta + \sin\beta\,\frac{d\beta}{d\alpha}\sin(\alpha+\beta)}{\cos^2\beta}\right] =$$

$$= R\omega^2\left[\frac{\cos(\alpha+\beta)}{\cos\beta} + \frac{\cos(\alpha+\beta)\cos\beta + \sin(\alpha+\beta)\sin\beta}{\cos^2\beta}\,\frac{d\beta}{d\alpha}\right] =$$

$$= R\omega^2\left[\frac{\cos(\alpha+\beta)}{\cos\beta} + \frac{\cos\alpha}{\cos^2\beta}\,\lambda\,\frac{\cos\alpha}{\cos\beta}\right] = R\omega^2\left[\frac{\cos(\alpha+\beta)}{\cos\beta} + \lambda\frac{\cos^2\alpha}{\cos^3\beta}\right].$$

$$j_p = R\omega^2\left[\frac{\cos(\alpha+\beta)}{\cos\beta} + \lambda\frac{\cos^2\alpha}{\cos^3\beta}\right] \tag{35}$$

Выражение для j_p как функции угла α в виде ряда Фурье получим, подставляя в равенство (34) выражение для v_p из равенства (28):

$$v_p = R\omega(\sin\alpha + 2\rho_2\sin 2\alpha - 4\rho_4\sin 4\alpha + 6\rho_6\sin 6\alpha - 8\rho_8\sin 8\alpha + - \ldots).$$

Имеем

$$j_p = R\omega^2(\cos\alpha + 4\rho_2\cos 2\alpha - 16\rho_4\cos 4\alpha +$$

$$+ 36\rho_6\cos 6\alpha - 64\rho_8\cos 8\alpha + - \ldots). \tag{36}$$

В табл. 4 даны числовые значения коэфициентов $4\rho_2$, $16\rho_4$, $36\rho_6$ и $64\rho_8$ для разных λ.

Таблица 4

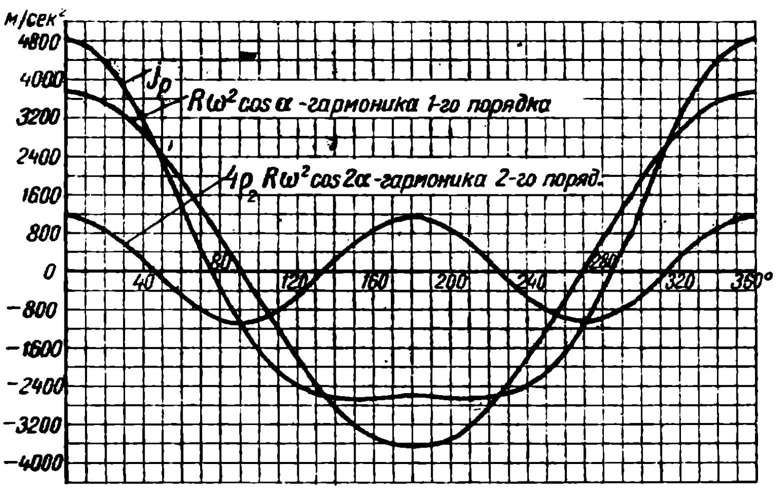
Значения коэфициентов $4\rho_2$, $16\rho_4$, $36\rho_6$, и $64\rho_8$ для различных λ

λ	$4\rho_2$	$16\rho_4$	$36\rho_6$	$64\rho_8$
$\frac{1}{3,4}$	0,3012	0,00678	0,000180	0,00000372
$\frac{1}{3,5}$	2916	621	150	304
$\frac{1}{3,6}$	2832	568	127	234
$\frac{1}{3,7}$	2756	522	110	206
$\frac{1}{3,8}$	2680	482	0,0000961	171
$\frac{1}{3,9}$	2608	443	842	142
$\frac{1}{4,0}$	2540	410	738	119

Как видно из этой таблицы, амплитуды гармоник быстро убывают с возрастанием порядка гармоники. Так, например, для $\lambda = \frac{1}{3,4}$ амплитуда гармоники 4-го порядка составляет 0,68%, а амплитуда гармоники 6-го порядка — только 0,018% от амплитуды гармоники 1-го порядка. Поэтому с достаточной для практики точностью ускорение поршня получим, ограничиваясь в ряде (36) гармоникой 2-го порядка и отбрасывая в коэфициенте ρ_2 члены, содержащие λ в степени выше первой, т. е.

$$j_p = R\omega^2(\cos\alpha + \lambda\cos 2\alpha). \qquad (37)$$

На фиг. 9 даны в виде примера кривая ускорения поршня по углу поворота кривошипа и гармоники этой кривой согласно ряду Фурье [равенство (36)] для иллюстрации их влияния на величину ускорения. Кривые построены для $R = 8,5$ *см*, $\lambda = \frac{1}{3,4}$ и $n = 2000$ об/мин.



Фиг. 9. Кривая ускорения поршня по углу поворота кривошипа и гармоники, ее составляющие, для $R = 8,5$ *см*, $\lambda = \frac{1}{3,4}$ и $n = 2000$ об/мин.

Значения угла α, при которых ускорение поршня максимально, найдутся из уравнения

$$\frac{dj_p}{d\alpha} = 0.$$