

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРА ВОЗМУЩАЮЩИХ ГАЗОВЫХ СИЛ ЧЕТЫРЕХТАКТНОГО ДИЗЕЛЯ ПО ЕГО ТЕОРЕТИЧЕСКИМ ИНДИКАТОРНЫМ ДИАГРАММАМ

При анализе факторов, вызывающих вибрацию (шум) поршневого двигателя внутреннего сгорания и крутильные колебания его вала, возникает необходимость определения спектра возмущающих газовых сил. Представляет интерес решение этой задачи по теоретическим индикаторным диаграммам дизеля, что открывает возможность учесть различные особенности протекания рабочего процесса.

Крутящий момент M_r одноцилиндрового четырехтактного двигателя, как и всякая периодическая функция, удовлетворяющая условиям Дирихле [1], может быть представлен рядом Фурье вида

$$\begin{aligned} M_r &= M_{r0} + M_{r0,5}^a \sin(0,5 \omega t + \gamma_{r0,5}) + M_{r1}^a \sin(\omega t + \gamma_{r1}) + \\ &+ M_{r1,5}^a \sin(1,5 \omega t + \gamma_{r1,5}) + \dots + M_{rk}^a \sin(k \omega t + \gamma_{rk}) = \\ &= M_{r0} + \sum_{k=0,5}^{\infty} M_{rk}^a \sin(k \omega t + \gamma_{rk}), \end{aligned} \quad (1)$$

где M_{r0} — средний крутящий момент;

M_{rk}^a — амплитудное значение k -го гармонического момента;

ω — угловая скорость вращения коленвала ($\omega = \text{const}$);

γ_{rk} — начальная фаза k -го момента по отношению к положению поршня в ВМТ при начале всасывания;

k — порядок гармонической составляющей, т. е. число полных периодов, совершаемых гармоникой за один оборот вала; у четырехтактного двигателя $k = 0,5; 1; 1,5; 2, \dots$

Средний крутящий момент M_{r0} обеспечивает преодоление момента нагрузки, а гармонические составляющие вызывают неравномерность вращения системы вала, возбуждая крутильные колебания.

Так как опрокидывающий момент равен и обратен по знаку

крутящему моменту, то к остоу двигателя приложен средний опрокидывающий момент $M_{г0}$ и гармонические моменты, изменяющиеся по синусоидальному закону.

При установленном режиме работы момент $M_{г0}$ создает в системе двигатель — рама (фундамент) постоянные по величине и направлению усилия, в то время как гармонические моменты, изменяющиеся по абсолютной величине и направлению, вызывают вынужденные колебания двигателя на раме.

Так как удельная тангенциальная сила

$$t_r = \frac{M_r}{F_n R} = \frac{T_r}{F_n},$$

где F_n — площадь поршня, а R — радиус кривошипа, то вместо функции M_r можно разложить в ряд функцию t_r и написать

$$t_r = p_r \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\cos \beta}. \quad (2)$$

Здесь $p_r = (p - p_0)$ — избыточное давление в цилиндре двигателя;

p и p_0 — соответственно абсолютное давление в цилиндре и давление окружающей среды;

α и β — текущие значения соответственно углов поворота кривошипа и наклона оси шатуна к оси цилиндра.

Разложение t_r в ряд Фурье для четырехтактного двигателя можно записать следующим образом:

$$t_r = t_{г0} + \sum_{k=0.5}^{\infty} t_{гk}^a \sin(k \omega t + \gamma_{гk}), \quad (3)$$

где $t_{г0}$ — среднее значение удельной тангенциальной силы;

$t_{гk}^a$ — гармонический коэффициент k -го порядка, равный

$$\frac{M_{гk}^a}{F_n R}.$$

В выражении (3) среднее значение удельной тангенциальной силы

$$t_{г0} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} t_r^0 d(\omega t). \quad (4)$$

Для вычисления величин $t_{гk}^a$ и $\gamma_{гk}$, входящих в формулу (3).

представим разложение функции t_r в ряд Фурье в другом виде [2]:

$$t_r = t_{r0} + \sum_{k=0,5}^{\infty} (B_k \sin k \omega t + A_k \cos k \omega t), \quad (5)$$

где

$$A_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} t_r^0 \cos k \omega t d(\omega t); \quad (6)$$

$$B_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} t_r^0 \sin k \omega t d(\omega t). \quad (7)$$

В формулы (4), (6) и (7) подставляется функция $t_r^0 = f(\omega t)$, которая определяется из $t_r = f(\omega_b t)$ при условии, что цикловая угловая скорость $\omega_b = \frac{1}{2}\omega$ (для четырехтактного двигателя), т. е. равенство $t_r^0 = t_r$ будет выполняться в любые моменты времени t и $2t$ соответственно для функций t_r^0 и t_r .

Сопоставляя формулы (3) и (5), имеем:

$$t_{гк}^a = \sqrt{A_k^2 + B_k^2}; \quad (8)$$

$$\operatorname{tg} \gamma_{гк} = \frac{A_k}{B_k}. \quad (9)$$

Четверть, в которой находится угол $\gamma_{гк}$, определяем, принимая во внимание знаки величин A_k и B_k : при положительных A_k и B_k $\gamma_{гк}$ находится в первой четверти; при положительном A_k и отрицательном B_k — во второй четверти; при отрицательных A_k и B_k — в третьей четверти и при отрицательном A_k и положительном B_k — в четвертой четверти.

Таким образом, если функция $t_r = f(\omega_b t)$ была бы задана в интервале $\alpha = 0 \div 4\pi$, то ее можно представить в виде ряда Фурье либо в форме равенства (5), вычислив значения A_k и B_k , либо в форме выражения (3), вычислив $t_{гк}^a$ и $\gamma_{гк}$. Для наших целей более удобна последняя форма, так как она позволяет представить крутящий (опрокидывающий) момент от газовых сил в виде

$$M_r = F_n R [t_{r0} + \sum_{k=0,5}^{\infty} t_{гк}^a \sin(k \omega t + \gamma_{гк})]$$

и по величинам $t_{ГК}^a$ судить о значимости той либо иной гармонической составляющей.

Удельная тангенциальная сила зависит от среднего эффективного давления p_e (индикаторного p_i). Поэтому для вычисления величин $t_{ГК}^a$ и $\gamma_{ГК}$ необходимо располагать теоретически-ми индикаторными диаграммами при различных значениях p_e .

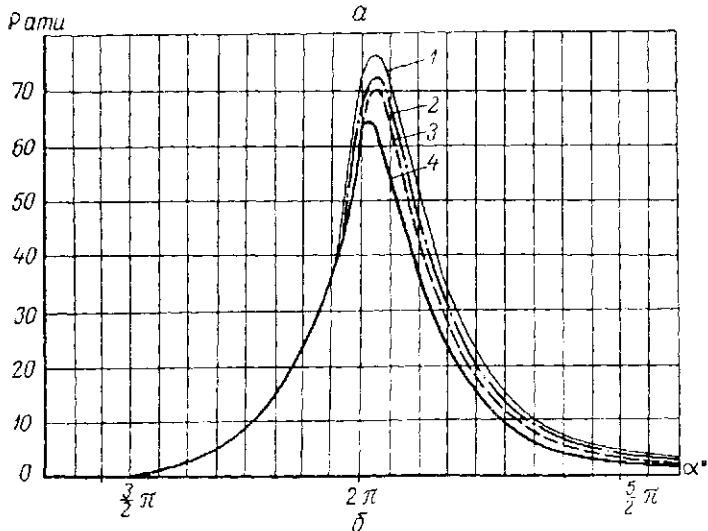
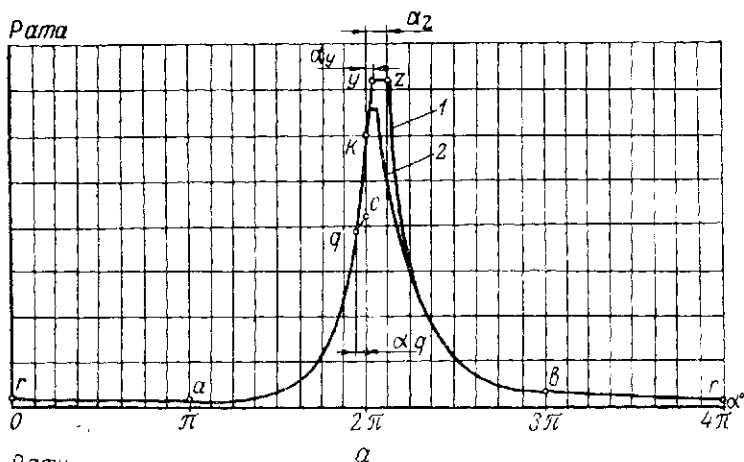


Рис. 1. Развернутые индикаторные диаграммы дизельного двигателя:

- а — теоретические индикаторные диаграммы при p_{e1} (1) и p_{e2} (2);
 б — экспериментальные индикаторные диаграммы при
 $p_e = 6,52 \text{ кг/см}^2$ (1), $p_e = 5,48 \text{ кг/см}^2$ (2),
 $p_e = 4,8 \text{ кг/см}^2$ (3), $p_e = 2,67 \text{ кг/см}^2$ (4)
 и $n = \text{const}$.

На рис. 1, а для p_{e1} приведена развернутая по углу α теоретическая индикаторная диаграмма четырехтактного дизельного двигателя, на которой ra — всасывание; ac — сжатие; g — начало видимого горения топлива; gy — горение топлива при $\frac{dp}{d\alpha} = \text{const}$; yz — горение топлива при $p = \text{const}$; zb — расширение; br — выхлоп.

В отличие от общепринятой теоретической схемы протекания рабочего процесса дизеля, в которой видимое горение начинается в ВМТ и происходит при $\frac{dp}{d\alpha} = \infty$ [3, 4], в нашем случае начало видимого горения происходит за α_g градусов от ВМТ и протекает при $\frac{dp}{d\alpha} = \text{const}$, что позволяет точнее отразить характер этого процесса в действительности.

На рис. 1, б приведен характерный вид совмещенных индикаторных диаграмм, снятых при работе дизеля по нагрузочной характеристике с разными значениями p_e [5]. Из рисунка видно, что до точки начала видимого горения протекание процесса сжатия не зависит от p_e , т. е. средний показатель политропы сжатия n_1 от p_e не зависит. Незначительно изменяется также момент начала видимого горения топлива (угол α_g) и средняя степень нарастания давления $\frac{dp}{d\alpha} = \omega_{cp}$. В зависимости от p_e изменяются значения максимального давления цикла (p_z), продолжительность горения при $p \approx \text{const}$ и протекание процесса расширения (показатель политропы расширения).

В соответствии с этим на рис. 1, а линией 2 показана индикаторная диаграмма для $p_{e2} < p_{e1}$, т. е. сделаны допущения о независимости от p_e политропы сжатия n_1 , угла начала видимого горения топлива α_g и средней степени нарастания давления ω_{cp} .

Если предположить, что известными величинами являются p_e , n_1 , α_g , ω_{cp} , $p_y = p_z = f(p_e)$, то из тождества [3]

$$p_e = \frac{L_i}{V_h} \eta_m \quad (10)$$

можно определить показатель политропы расширения n_2 .

В выражении (10):

L_i — цикловая индикаторная работа газов, совершенная ими в цилиндре двигателя;

V_h — рабочий объем цилиндра двигателя;

η_m — механический к. п. д. двигателя с учетом насосных потерь на тактах всасывания и выхлопа.

Цикловая индикаторная работа

$$L_i = L_{ky} + L_{yz} + L_{zb} - (L_{gu} + L_{kg}), \quad (11)$$

где L_{ky} , L_{yz} , L_{zb} , L_{ga} и L_{kg} — работы, совершаемые газами на соответствующих участках индикаторной диаграммы.

Следует заметить, что если функция $p=f(V)$ задана в координатах $p-V$, то работа, совершенная газами на каком-то отрезке $[V_e, V_f]$, определяется площадью, расположенной под этой кривой, т. е.

$$L_{ef} = \int_{V_e}^{V_f} f(V) dV. \quad (12)$$

Поскольку $V = \varphi(\alpha)$, то в интеграле можно осуществить замену переменных

$$L_{ef} = \int_{V_e}^{V_f} f(V) dV = \int_{\alpha_e}^{\alpha_f} f[\varphi(\alpha)] dV \approx F_n R \int_{\alpha_e}^{\alpha_f} f[\varphi(\alpha)] \left(\sin \alpha + \frac{\lambda}{2} \sin 2\alpha \right) d\alpha. \quad (13)$$

Так как $dV = d(V_c + F_n S) = F_n dS$, а S — текущее значение хода поршня приближенно подсчитывают по [2].

$$S = R \left[\left(1 + \frac{\lambda}{4} \right) - \left(\cos \alpha + \frac{\lambda}{4} \cos 2\alpha \right) \right], \quad (14)$$

то

$$dS = R \left(\sin \alpha + \frac{\lambda}{2} \sin 2\alpha \right) d\alpha,$$

а

$$dV = F_n R \left(\sin \alpha + \frac{\lambda}{2} \sin 2\alpha \right) d\alpha.$$

Таким образом, пользуясь выражением (13), можно вычислить работу газов в том случае, если функции $p=f(V)$ на отрезке $[\alpha_e, \alpha_f]$ задана в координатах $p-\alpha$.

Уравнение линии ky (см. рис. 1, а) в координатах $p-\alpha$

$$p = p_k + \omega_{cp} \alpha,$$

где $p_k = \omega_{cp} \alpha_g + p_g$ — давление в цилиндре в точке k по индикаторной диаграмме.

Тогда

$$\begin{aligned}
 L_{ky} &= F_{II} R \int_{\alpha_K}^{\alpha_Y} (\rho_K + \omega_{cp} \alpha) \left(\sin \alpha + \frac{\lambda}{2} \sin 2\alpha \right) d\alpha = \\
 &= F_{II} R \left\{ \omega_{cp} \left[\sin \alpha_Y - \alpha_Y \left(1 + \frac{\lambda}{4} \right) \cos \alpha_Y + \frac{\lambda \sin 2\alpha_Y}{8} \right] - \right. \\
 &\quad \left. - \rho_K \left(\cos \alpha_Y + \frac{\lambda}{4} \cos 2\alpha_Y \right) + \rho_K \left(1 + \frac{\lambda}{4} \right) \right\} = A_1. \quad (15)
 \end{aligned}$$

Уравнение линии gh (см. рис. 1, а)

$$p = p_K - \omega_{cp} \alpha$$

и работа

$$\begin{aligned}
 L_{kg} &= F_{II} R \int_{\alpha_K}^{\alpha_g} (p_K - \omega_{cp} \alpha) \left(\sin \alpha + \frac{\lambda}{2} \sin 2\alpha \right) d\alpha = \\
 &= F_{II} R \left\{ p_K \left(1 + \frac{\lambda}{4} \right) - p_K \left(\cos \alpha_g - \frac{\lambda}{4} \cos 2\alpha_g \right) - \omega_{cp} \times \right. \\
 &\quad \left. \times \left[\sin \alpha_g - \alpha_g \left(1 + \frac{\lambda}{4} \right) \cos \alpha_g + \frac{\lambda}{8} \sin 2\alpha_g \right] \right\} = A_2. \quad (16)
 \end{aligned}$$

Работы L_{yz} , L_{zb} и L_{ga} соответственно равны [3]:

$$L_{yz} = p_z (V_z - V_y); \quad (17)$$

$$L_{zb} = \frac{p_z V_z}{n_2 - 1} \left[1 - \left(\frac{V_z}{V_b} \right)^{n_2 - 1} \right]; \quad (18)$$

$$L_{ga} = \frac{1}{n_1 - 1} (p_g V_g - p_a V_a). \quad (19)$$

Величины p_K , p_g , p_a , $V_z(z_z)$ и $V_y(z_y)$ представляют собой давление и объемы (углы — в координатах $p - \alpha$) в соответствующих точках рабочего процесса. Значения этих параметров за исключением $V_y(z_y)$ определяются из теплового расчета, который выполняется по общепринятой методике для смешанного цикла [3, 4]. Значение α_y определяется из геометрических соображений — при пересечении линий gy и yz (в координатах $p - \alpha$).

Подставляя приведенные значения L_{ky} , L_{yz} , L_{zb} , L_{ga} и L_{kg} в исходное уравнение (10), получим

$$L_i = A_1 + p_z(V_z - V_y) + \frac{p_z V_z}{n_2 - 1} \left[1 - \left(\frac{V_z}{V_b} \right)^{n_2 - 1} \right] - \\ - \left[\frac{1}{n_1 - 1} (p_g V_g - p_a V_a) + A_2 \right] = \\ = \frac{p_z V_z}{n_2 - 1} \left[1 - \left(\frac{V_z}{V_b} \right)^{n_2 - 1} \right] + A, \quad (20)$$

где $A = A_1 + p_z(V_z - V_y) - \left[\frac{1}{n_1 - 1} (p_g V_g - p_a V_a) + A_2 \right]$.

Если левую часть уравнения (20) определить по выражению (10), то из него можно найти показатель политропы расширения n_2 и функция $p = f(z)$ на отрезке $[\pi, 3\pi]$ будет полностью определена.

Поскольку крутящий момент на линиях всасывания и выхлопа невелик, то при гармоническом анализе им обычно пренебрегают, считая, что функции $p = f_2(\alpha)$ и $p = f_3(\alpha)$ соответственно на отрезках $[0, \pi]$ и $[3\pi, 4\pi]$ равны нулю. Нами же было принято, что в координатах $p-V$ эти функции изменяются по линейному закону. Уравнения линий соответственно для указанных отрезков запишутся:

$$p = \frac{(p_r - p_a)(V_a - V)}{V_a - V_c} + p_a; \quad (21)$$

$$p = \frac{(p_b - p_a)(V - V_c)}{V_a - V_c} + p_r. \quad (22)$$

Выражения (21) и (22) представляют уравнения прямых, проходящих через две заданные точки: в первом случае это точки r и a , во втором — точки b и r (p_r — давление в начале выпуска).

Таким образом, функция p на отрезке $[0, 4\pi]$ задана в виде кусочно-непрерывной функции (табл. 1).

Используя уравнение (2), подсчитываем функцию $t_r = f(\omega_n t)$, которую затем по формулам (6), (7), (8) и (9) раскладываем в ряд, т. е. определяем гармонические коэффициенты $t_{гk}^a$ и начальные фазы $\gamma_{гk}$ гармонических составляющих удельной тангенциальной силы t_r . Расчет проводится для ряда значений p_c . По полученным данным строятся кривые $t_{гk}^a = f(p_i)$ и $\gamma_{гk} = f(p_i)$, где $p_i = p_c + p_r$. Так как обычно принимают, что p_r за-

Пределы изменения		Функция ρ_r
α	γ	
$0 \div \pi$	$V_c \div V_a$	$\rho_r = \left[\frac{(\rho_r - \rho_a)(V_a - V)}{V_a - V_c} + \rho_a \right] - \rho_0$
$\pi \div (2\pi - \alpha_g)$	$V_a \div V_g$	$\rho_r = \left(\frac{V_a}{V} \right)^n \rho_a - \rho_0$
$(2\pi - \alpha_g) \div 2\pi$	$V_g \div V_c$	$\rho_r = (\rho_k - \omega_{cp} \alpha) - \rho_0$
$2\pi \div (2\pi + \alpha_y)$	$V_c \div V_y$	$\rho_r = (\rho_k + \omega_{cp} \alpha) - \rho_0$
$(2\pi + \alpha_y) \div (2\pi + \alpha_z)$	$V_y \div V_z$	$\rho_r = \rho_z - \rho_0$
$(2\pi + \alpha_z) \div 3\pi$	$V_z \div V_a$	$\rho_r = \left(\frac{V_z}{V} \right)^n \rho_z - \rho_0$
$3\pi \div 4\pi$	$V_a \div V_c$	$\rho_r = \left[\frac{(\rho_b - \rho_a)(V - V_c)}{V_a - V_c} + \rho_r \right] - \rho_0$

висит лишь от оборотов [3], то при работе двигателя по нагрузочной характеристике можно считать $\rho_r = \text{const}$.

Ввиду громоздкости расчетов, связанных с вычислением функций $t_r = f(\omega_r t)$ для разных ρ_r и разложением их в ряд Фурье, они выполнялись на ЭВМ «Минск-2». Алгоритмом расчета явилась изложенная выше методика. Расчеты проводились применительно к тракторному дизелю Д-50. Исходные данные, необходимые для расчета, сведены в табл. 2.

Интегралы (4), (6) и (7) вычислялись по обобщенной формуле Симпсона [6] без остаточного члена, величиной которого можно пренебречь при большом числе разбиений отрезка интегрирования $[c, d]$

$$\int_c^d \varphi(x) dx = \frac{d-c}{6m} [y_0 + 4y_1 + 2y_2 + 4y_3 + \dots + 4y_{2m-1} + y_{2m}],$$

где $\varphi(x)$ — подынтегральная функция;

$2m = \frac{d-c}{h}$ — число разбиений отрезка $[c, d]$, где h — шаг

разбиения (принималось $2m = 720$);

d и c — верхний и нижний пределы интегрирования;

y_0, y_1, \dots, y_{2m} — значения функции $\varphi(x)$ в соответствующих точках.

Поскольку в нашем случае подынтегральная функция в выражениях (4), (6), (7) знакопеременна на отрезке интегрирова-

№ п.п.	Исходные данные		
	Обозначение	Наименование	Для двигателя Д-50
1	ε	Степень сжатия	17
2	V_h	Рабочий объем	4,75 л
3	λ	Отношение радиуса кривошипа к длине шатуна	0,172
4	p_0	Давление окружающей среды	1,033 кг/см ²
5	T_0	Температура окружающей среды	288°K
6	m_1	Молекулярный вес воздуха	28,95
7	p_0	Давление начала такта сжатия	0,9 кг/см ²
8	ΔT_{a0}	Подогрев стенок при $p_e = 0$ кг/см ²	5°
9	p_r	Давление остаточных газов	1,15 кг/см ²
10	T_r	Температура остаточных газов	750°K
11	n_1	Показатель политропы сжатия	1,35
12	z_g	Начало видимого горения в градусах относительно ВМТ	2° до ВМТ
13	w_{cp}	Жесткость протекания рабочего процесса на линии $g\gamma$	4 кг/см ² ·град
14	p_{z0}	Максимальное давление цикла при $p_e = 0$ кг/см ²	60 кг/см ²
15	p_z	Максимальное давление цикла при определенных значениях p_e	$p_z = p_{z0} \cdot \kappa_1 \cdot p_e$ где $\kappa_1 = \text{const}$
16	ξ_z	Коэффициент выделения тепла в точке z [известно $\xi_z = f(p_e)$]	0,85 независимо от p_e
17		Химический состав дизельного топлива	$C = 0,86$ $H = 0,13$ $O_T = 0,01$
18	Q'_H	Нижшая теплотворная способность дизельного топлива	10200 ккал/кг
19	p_T	Среднее давление механических потерь для n об/мин	2,1 кг/см ² при $n = 1700$ об/мин
20	p_e	Среднее эффективное давление (пределы и шаг изменения)	0-7 кг/см ² , шаг 1 кг/см ²
21	g_e	Удельный эффективный расход топлива при определенных значениях p_e	По нагрузочной характеристике

ния, то, для того чтобы можно было применить формулу Симпсона, использовался искусственный прием — параллельный сдвиг оси абсцисс против направления оси ординат на величину

$$a = |y_{k \min}| + b,$$

где b — положительное число;

$y_{k \min}$ — минимальное значение функции $\varphi(x)$ на отрезке $[c, d]$.

Тогда ординаты в новой системе координат вычисляются

$$y'_0 = a + y_0;$$

$$y_1' = a + y_1;$$

$$\dots$$

$$y_{2m}' = a + y_{2m},$$

а площадь под кривой $F = \varphi(x) + a$ определится

$$\int_c^d [\varphi(x) + a] dx = \int_c^d \varphi(x) dx + \int_c^d a dx =$$

$$= \int_c^d \varphi(x) dx + a(d - c).$$

Отсюда следует, что

$$\int_c^d \varphi(x) dx = \int_c^d [\varphi(x) + a] dx - a(d - c).$$

В этом выражении функция $F = \varphi(x) + a$ на отрезке $[c, d]$ положительна, и поэтому вычисление площади под этой кривой можно производить, пользуясь обобщенной формулой Симпсона. В связи с этим вычисление $\int_c^d \varphi(x) dx$ не представляет каких-либо затруднений.

Результаты вычислений величин $t_{\text{ГК}}^a$ и $\gamma_{\text{ГК}}$ для гармоник 0,5; 1; 1,5 ... 12 порядков, выполненных по описанной методике на ЭВМ «Минск-2», представлены соответственно на рис. 2, а, б и 3. Из приведенных данных следует, что по мере возрастания k значение гармонических коэффициентов $t_{\text{ГК}}^a$ при данном p_i убывает. Исключение для всего диапазона p_i составляет гармоника 0,5 порядка, а на некоторых режимах — гармоники 1 и 2 порядков. Увеличение p_i ведет к возрастанию $t_{\text{ГК}}^a$ у всех гармонических составляющих, причем повышение p_i и порядка гармонической составляющей вызывает резкие изменения начальной фазы $\gamma_{\text{ГК}}$.

Сопоставление расчетных значений величин $t_{\text{ГК}}^a$ и $\gamma_{\text{ГК}}$, а также характера их протекания в функции от p_i с теми же величинами, полученными рядом авторов на основе действительных индикаторных диаграмм, показывает хорошее их совпадение [7, 8, 9]. В связи с этим можно считать, что описанная методика расчета себя оправдала.

Воспользуемся этой методикой для исследований на ЭВМ различных факторов, могущих оказать влияние на величины $t_{\text{ГК}}^a$ и $\gamma_{\text{ГК}}$.

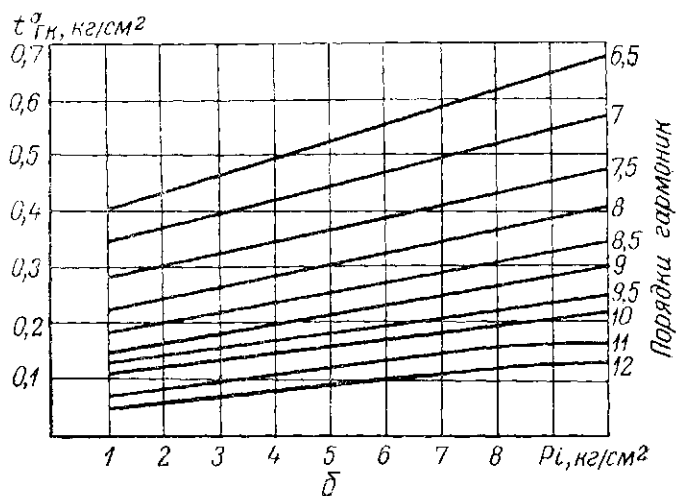
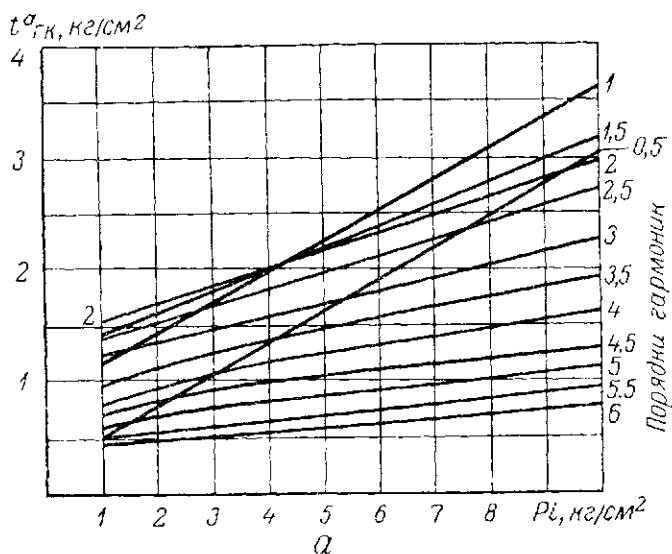


Рис. 2. Гармонические коэффициенты $t_{ГК}^a$ четырех-
тактного дизеля:

a — для гармоник 0,5; 1; 1,5 ... 6-го порядков;
 b — для гармоник 6,5; 7; 7,5 ... 12-го порядков.

Программа исследований на ЭВМ включала изучение зависимости величин $t_{ГК}^a$ и $\gamma_{ГК}$ от: характера протекания функций p на линиях ra — всасывания, br — выхлопа и gy — линии видимого горения топлива; различной степени предварительного расширения ρ изменения параметра λ .

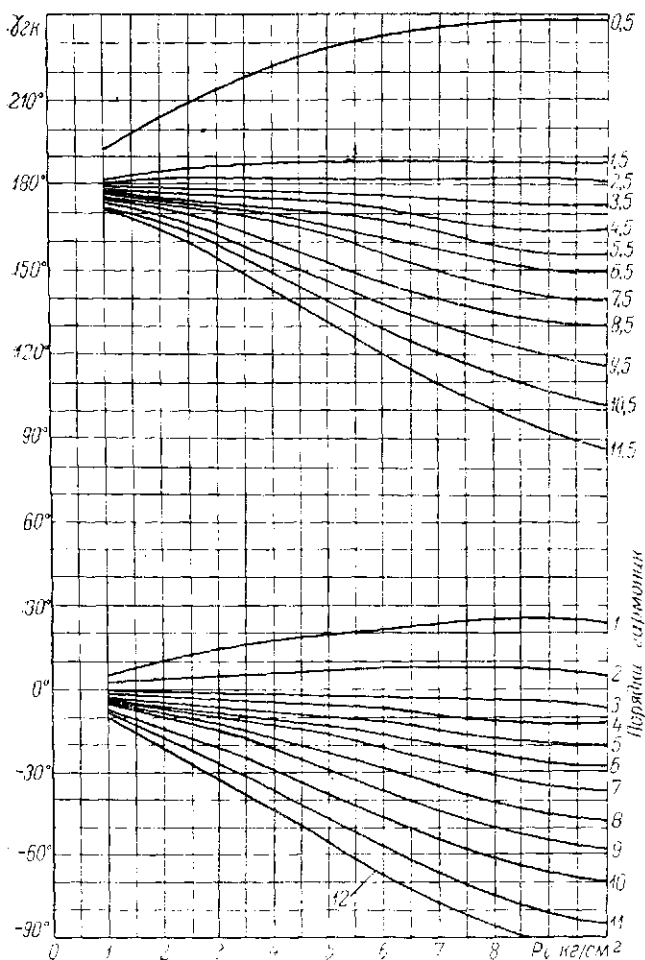


Рис. 3. Начальные фазы гармонических моментов 0,5; 1; 1,5; 2; ... 12-го порядков от газов у четырехтактного дизеля.

Были рассмотрены два варианта задания функции $p = f_2(\alpha)$ и $p = f_3(\alpha)$ соответственно на отрезках $[0, \pi]$ и $[3\pi, 4\pi]$: первый — формулами (21) и (22), второй — значениями функций p на этих же отрезках $p = f_2(\alpha) = 0$ и $p = f_3(\alpha) = 0$. Вычисления проводились для двух значений $p_c = 0 \text{ кг/см}^2$ и 7 кг/см^2 . Расчеты показали, что наибольшие изменения по абсолютной величине у гармонических коэффициентов отмечаются у гармоник 0,5; 1; ... 3 порядков, которые не превышают 5—7% от начального значения (вариант 1) соответствующих гармонических состав-

ляющих. У гармоник более высокого порядка эти изменения малозначительны. Начальная фаза гармонических составляющих $\gamma_{гк}$ меняется незначительно в пределах $0 \div 3^\circ$. Таким образом, закон изменения функций $p = f_2(x)$ и $p = f_3(x)$ соответственно на отрезках $[0, \pi]$ и $[3\pi, 4\pi]$ практически не оказывает заметного влияния на величины $t_{гк}^a$ и $\gamma_{гк}$, поэтому при гармоническом анализе функции $t_r = f(\omega_r t)$ можно принимать на рассматриваемых отрезках $p = f_2(x) = f_3(x) = 0$.

Влияние жесткости протекания рабочего процесса исследовалось при значении $p_e = 6 \text{ кг/см}^2$ и $\omega_{ер} = 2,5; 5; 7,5; 10 \text{ кг/см}^2$ на 1° поворота коленчатого вала, характерных для современных дизелей [3, 4]. При этом соответственно $p_z = 65; 76; 88$ и 100 кг/см^2 .

Наиболее существенные изменения величин $t_{гк}^a$ и $\gamma_{гк}$ наблюдаются у гармоник, начиная с третьей и выше. Изменения начальных фаз у одноименных гармонических составляющих доходит до 51° от исходного ($\omega_{ер} = 2,5 \text{ кг/см}^2 \cdot \text{град}$), а гармонических коэффициентов $t_{гк}^a$ до $15 \div 45\%$.

Таким образом, повышение жесткости протекания рабочего процесса оказывает значительное влияние на величину гармонических составляющих выше третьего порядка, и это следует учитывать при определении значений $t_{гк}^a$ и $\gamma_{гк}$.

Изучение влияния степени предварительного расширения ρ на величины $t_{гк}^a$ и $\gamma_{гк}$ проводилось при $p_e = 7 \text{ кг/см}^2$ и $\rho = 1,20; 1,35$ и $1,50$; при номинальном режиме двигателя обычно $\rho = 1,3 \div 1,5$ [4].

Из полученных данных следует, что увеличение ρ приводит к возрастанию величин $t_{гк}^a$ - незначительному по относительной величине у гармоник низких порядков и значительному (до 25%) у гармоник более высоких порядков. Начальные фазы $\gamma_{гк}$ у гармоник, начиная с 4-й и выше уменьшаются, а у гармоник до 4-й при одних значениях ρ начальные фазы уменьшаются, а при других увеличиваются. Следовательно, величина ρ может оказывать значительное воздействие на численное значение гармоник высших порядков.

Влияние величины λ на значения $t_{гк}^a$ и $\gamma_{гк}$ определялось при $p_e = 7 \text{ кг/см}^2$ и переменном $\lambda = 0,2; 0,3; 0,4$ и $0,5$; у современных автотракторных двигателей $\lambda = \frac{1}{3} \div \frac{1}{4,2}$ [10].

Было установлено, что с увеличением λ величины $t_{гк}^a$ возрастают у гармоник, начиная со второй; прирост по абсолютной величине невелик, однако у гармоник более высоких порядков он составляет $10-40\%$. У гармоник $0,5; 1$ и $1,5$ порядков с увеличением λ наблюдается как спад, так и возрастание величин $t_{гк}^a$. Степень влияния изменения отношения λ на углы $\gamma_{гк}$

определяется порядком гармонической составляющей. Увеличение λ приводит к сдвигам начальных фаз на величину от $50'$ до 20° соответственно для гармоник низшего и высшего порядков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Серебренников М. Б. Гармонический анализ. ОГИЗ — Гостехиздат, М., 1948.
2. Нейман И. Ш. Динамика авиационных двигателей. Оборонгиз, 1940.
3. Иноземцев Н. В. Курс тепловых двигателей. Оборонгиз, 1954.
4. Нигматулин И. И. Рабочие процессы в турбопоршневых двигателях. Машгиз, 1962.
5. Труды НАТИ, выпуск 173, ОНТИ-НАТИ, М., 1964.
6. Березин И. С., Жидков Н. П. Методы вычислений. Т. 1, Физматгиз, 1959.
7. Терских В. П. Расчеты крутильных колебаний силовых установок. Справочное пособие, т. 1, Судпромгиз, 1954.
8. Лурье И. А. Крутильные колебания в дизельных установках. Госвосмориздат, 1940.
9. Львов Е. Д. Динамика поршневых двигателей. М.—Л. Главная редакция автотракторной литературы, 1936.
10. Поляк К. Г. Динамика автомобильных и тракторных двигателей. Машиностроение, 1965.