Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. XXXIX, вып. 1, 1959 г.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ К ИССЛЕДОВАНИЮ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ МОЛОТКОВ

Ю. Н. Попов

Новый метод расчета работы удара и расхода воздуха

Работа удара. Рабочие процессы, происходящие в цилиндре пневматических молотков, в основном характеризуются дифференциальными уравнениями истечения идеального газа [3] и движения поршня [2] (без учета противодавления)

$$d\pi_x = -\pi_x n \frac{dV_x}{V_x} + \mu n \sqrt{\frac{2ngRT_0}{n-1}}\, \pi_x^{\frac{1}{n}} \sqrt{1-\pi_x^{\frac{n-1}{n}}}\, \frac{f_x dt}{V_x}; \qquad (1)$$

$$\frac{d^2h}{dt^2} = \frac{F}{m} p, \qquad (2)$$

где π_x — отношение давления в верхней полости цилиндра к давлению в шланге p_0;*
V_x — объем, описываемый поршнем;
n — показатель политропы;
μ — коэффициент истечения;
R — газовая постоянная воздуха;
T_0 — температура воздуха в шланге;
f_x — площадь впуска воздуха; принимаем $f_x = f = \text{const}$;
h, F, m и t — путь, площадь поперечного сечения, масса и время движения поршня.

Так как система уравнений (1) и (2) в конечной форме не интегрируется, то для решения приближенными методами приведем ее к безразмерному виду. Введем следующие безразмерные обозначения:

1) отношение переменного давления к начальному

$$y = \frac{p}{p_0}; \qquad (3)$$

2) отношение переменного пути поршня к пути поршня

$$x = \frac{h - h_0}{h_{\text{н}} A^2}, \qquad (4)$$

* Противодавление не учитывается.

где h_0 — мертвое пространство;

$h_н$ — максимальный путь поршня, соответствующий времени наполнения верхней полости цилиндра;

A — безразмерная величина, включающая параметры молотка и некоторые постоянные,

$$A = \frac{\mu f}{F}\sqrt{2g\frac{n}{n-1}RT_0\frac{m}{Fp_0h_н}}; \qquad (5)$$

3) отношение переменного времени к выбранной относительной единице измерения At_0

$$\tau = \frac{t}{At_0}, \qquad (6)$$

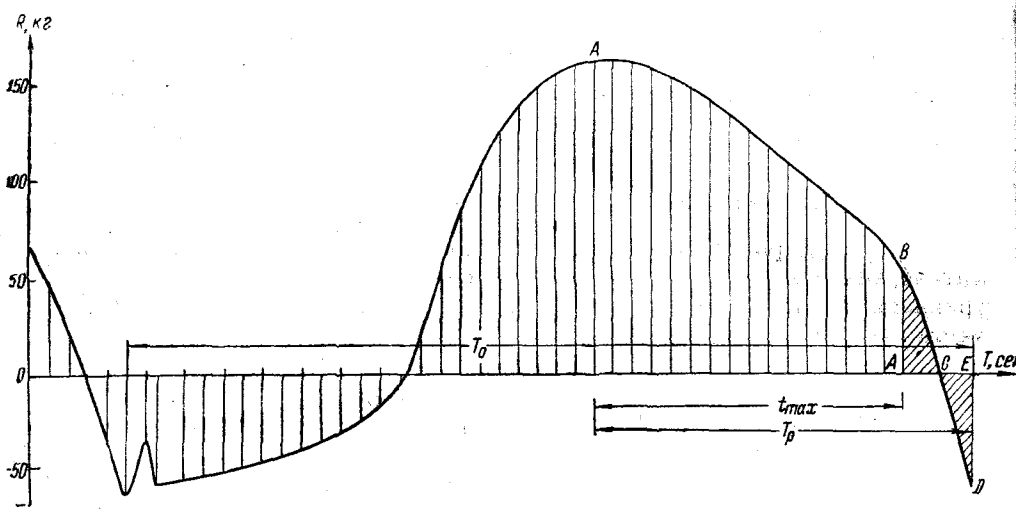


Рис. 1. Индикаторное усилие, действующее на поршень бурильного молотка ОМ-506-Л при $p = 5$ *amu*, $\triangle ABC = \triangle CДE$

где

$$t_0 = \sqrt{\frac{mh_н}{Fp_0}};$$

4) среднее безразмерное постоянное ускорение

$$a = \frac{m}{Fp_{ср}}\frac{d^2h}{dt^2} = \text{const} \qquad (7)$$

($p_{ср}$ — среднее давление, энергетически эквивалентное действительному).

Будем считать, что накопление энергии удара происходит в основном на участке наполнения верхней полости цилиндра (рис. 1). Для приближенного решения уравнения (1) используем математическую замену, известную в теории поршневых машин,

$$\pi_x^{\frac{1}{n}}\sqrt{1-\pi_x^{\frac{n-1}{n}}} \approx a_1\pi_x - b_1\pi_x^2. \qquad (8)$$

Подставив это приближенное равенство в формулу (1), получим линейное дифференциальное уравнение Бернулли

$$d\pi_x - \pi_x\left(\mu na'\frac{f_x}{V_x} - n\frac{dV_x}{dt}\frac{1}{V_x}\right)dt - \pi_x^2\mu nb'\frac{f_x dt}{V_x} = 0, \qquad (9)$$

где $$a' = a_1 \sqrt{\frac{2}{n-1} ngRT_0};$$

$$b' = b_1 \sqrt{\frac{2}{n-1} ngRT_0}$$

получим

$$\pi_x = \frac{\varphi(t)\left(\frac{V_0}{V_x}\right)^n}{\frac{1}{\pi_0} + \frac{b'}{a'}\left\{\int_{t_0}^{t}\left[\varphi(t)\left(\frac{V_0}{V_x}\right)^n\right] + nV_0{}^n\int_{\tau_0}^{\tau}\varphi(\tau)\,V_x{}^{-n-1}dV_x\right\}}, \qquad (10)$$

где

$$\varphi(t) = e^{\mu n a' I_1}.$$

Коэффициенты a_1 и b_1 находятся методом наименьших квадратов [4].

Найдем вначале I_1 — приведенное время-сечение.

Принимаем $f_x = f = \text{const}$.

Очевидно, что $V_x = Fh$, поэтому

$$I_1 = \int_{t_0}^{t} \frac{f_x dt}{V_x} = \frac{f}{F}\int_{t_0}^{t}\frac{dt}{h} = \frac{f}{F}\int_{\tau_0}^{\tau}\frac{d\tau}{x},$$

где $x = \frac{a\tau^2}{2}$, так как $\frac{d^2x}{d\tau^2} = a$ (по уравнению (7).

Получим далее в безразмерной форме

$$I_1 = \frac{f}{F}\int_{\tau_0}^{\tau}\frac{2d\tau}{a\tau^2} = \frac{2f}{aF}\left(\frac{1}{\tau_0} - \frac{1}{\tau}\right).$$

Единица измерения ускорения

$$a_0 = \frac{2h_{\text{н}}A^2}{A^2t_0{}^2} = \frac{2h_{\text{н}}}{t_0{}^2}.$$

Здесь в формуле $a = \frac{2x}{\tau^2}$ значения x и τ из выражений (4) и (6). В размерной форме среднее ускорение

$$a_{\text{ср}} = aa_0.$$

Подставляя последнее равенство в выражение для I_1 и учитывая, что $t = At_0\tau$, получим размерную форму

$$I_1 = \frac{2f}{aF}\left(\frac{1}{\tau_0} - \frac{1}{\tau}\right)\frac{t_0{}^2}{2h_{\text{н}}At_0} = \frac{f}{aF}\left(\frac{1}{\tau_0} - \frac{1}{\tau}\right)\frac{t_0}{h_{\text{н}}A}. \qquad (11)$$

Найдем значение функции $\varphi(\tau) = e^{\mu n a' I_1}$

На основании равенств (7), (9) и (11)

$$\varphi(\tau) = e^{\frac{na_1}{a}\left(\frac{1}{\tau_0} - \frac{1}{\tau}\right)}. \qquad (12)$$

Далее имеем

$$\left(\frac{V_0}{V_x}\right)^n = \left(\frac{h_0}{h}\right)^n = \left(\frac{\tau_0}{\tau}\right)^{2n} = \left(\frac{1}{A\tau}\right)^{2n}, \qquad (13)$$

кроме того,

$$V_0^n = \left(F\frac{a\tau_0^2}{2}\right)^n = \left(\frac{Fa}{2A^2}\right)^n, \qquad (14)$$

так как $\tau = \frac{t}{At_0}$ и $\tau_0 = \frac{1}{A}$.

Найдем интеграл

$$I_2 = nV_0^n \int_{\tau_0}^{\tau} \varphi(\tau)\, V_0^{-n-1} dV_x =$$

$$= n\left(\frac{Fa}{2A^2}\right)^n \int_{\tau_0}^{\tau} e^{\frac{-na_1}{a\tau}} \int_{\tau_0}^{\tau} \left(\frac{Fa\tau^2}{2}\right)^{-n-1} d\left(\frac{Fa\tau^2}{2}\right) =$$

$$= n\left(\frac{Fa}{2A^2}\right)^n \int_{\tau_0}^{\tau} e^{\frac{-na_1}{a\tau}} \int_{\tau_0}^{\tau} \left(\frac{2}{Fa\tau^2}\right)^n \left(\frac{2}{Fa\tau^2}\right)\left(\frac{Fa}{2}\right) 2\tau d\tau =$$

$$= \frac{2n}{A^{2n}} \int_{\tau_0}^{\tau} e^{\frac{na_1}{a}\left(\frac{1}{\tau_0}-\frac{1}{\tau}\right)} \frac{d\tau}{\tau^{2n+1}}. \qquad (15)$$

Подставив выражения (11)—(15) в формулу (10), получим

$$\pi_x = \frac{\left(\frac{1}{A\tau}\right)^{2n} e^{\frac{na_1}{a}\left(\frac{1}{\tau_0}-\frac{1}{\tau}\right)}}{\frac{1}{\pi_0} + \frac{b_1}{a_1}\left[e^{\frac{na_1}{a}\left(\frac{1}{\tau_0}-\frac{1}{\tau}\right)}\left(\frac{1}{A\tau}\right)^{2n} - 1 + \frac{2n}{A^{2n}}\int_{\tau_0}^{\tau} e^{\frac{na_1}{a}\left(\frac{1}{\tau_0}-\frac{1}{\tau}\right)} \frac{d\tau}{\tau^{2n+1}}\right]}. \qquad (16)$$

Интеграл в этом выражении не может быть представлен в конечном виде с помощью элементарных функций, поэтому разложим подинтегральную функцию в ряд. Для этого предварительно преобразуем подинтегральную функцию, чтобы можно было воспользоваться не рядом Тейлора, а более простым рядом Маклорена

$$I_3 = e^{\frac{na_1}{a\tau_0}} \int_{\tau_0}^{\tau} e^{\frac{-na_1}{a\tau}} \frac{d\tau}{\tau^{2n+1}}.$$

Числитель разлагается в следующий знакопеременный ряд:

$$e^x \approx \sum_0^m \frac{x^m}{m!},$$

который сходится для $|x| < \infty$ (по правилу Лейбница) и, следовательно, может быть проинтегрирован

$$I_3 = e^{\frac{na_1}{a\tau_0}} \int_{\tau_0}^{\tau} \sum_0^m \left(-\frac{na_1}{a\tau}\right)^m \frac{1}{m!} \frac{d\tau}{\tau^{2n+1}} = e^{\frac{na_1}{a\tau_0}} \sum_0^m \int_{\tau_0}^{\tau} \left(-\frac{na_1}{a}\right)^m \frac{d\tau}{m!\tau^{m+2n+1}} =$$

$$= e^{\frac{na_1}{a\tau_0}} \sum_0^m \left(-\frac{na_1}{a}\right)^m \frac{1}{m!} \int_{\tau_0}^{\tau} \frac{d\tau}{\tau^{m+2n+1}} = e^{\frac{na_1}{a\tau_0}} \sum_0^m \frac{1}{m!}\left(-\frac{na_1}{a}\right) \frac{(\tau-\tau_0)^{-m-2n}}{(-m-2n)} =$$

$$= e^{\frac{na_1}{a\tau_0}} \sum_0^m \frac{-\left(-\frac{na_1}{a}\right)^m}{(m+2n)(\tau-\tau_0)^{m+2n}}.$$

Подставив это выражение в формулу (16), получим

$$\pi_x = \frac{\frac{1}{(A\tau)^{2n}} e^{\frac{na_1}{a}\left(\frac{1}{\tau_0}-\frac{1}{\tau}\right)}}{\frac{1}{\pi_0}+\frac{b_1}{a_1}\left\{\frac{1}{(A\tau)^{2n}} e^{\frac{na_1}{a}\left(\frac{1}{\tau_0}-\frac{1}{\tau}\right)} - 1 + \frac{2n}{A^{2n}} e^{\frac{na_1}{a\tau_0}} \sum_0^m \frac{-\left(-\frac{na_1}{a}\right)^m}{(m+2n)(\tau-\tau_0)^{m+2n}}\right\}}$$

или

$$\pi_x = \frac{\left(\frac{\tau_0}{\tau}\right)^{2n} e^{\frac{na_1}{a}\left(\frac{1}{\tau_0}-\frac{1}{\tau}\right)}}{\frac{1}{\pi_0}+\frac{b_1}{a_1}\left\{\left(\frac{\tau_0}{\tau}\right)^{2n} e^{\frac{na_1}{a}\left(\frac{1}{\tau_0}-\frac{1}{\tau}\right)} - 1 + 2n\tau_0^{2n} e^{\frac{na_1}{a\tau_0}} \sum_0^m \frac{-\left(-\frac{na_1}{a}\right)^n}{(m+2n)(\tau-\tau_0)^{m+2n}}\right\}}. \quad (17)$$

Формула (17) и является искомой зависимостью безразмерного давления от безразмерного времени. Однако ее можно значительно упростить, приняв процесс изотермическим ($n=1$). Отклонение действительного политропического процесса от изотермического учитывается величинами a_1 и b_1 [4], полученными из осциллограмм (см. рис. 1).

При $n=1$ формула (17) принимает вид

$$\pi_x = \frac{\left(\frac{\tau_0}{\tau}\right)^2 e^{\frac{a_1}{a}\left(\frac{1}{\tau_0}-\frac{1}{\tau}\right)}}{\frac{1}{\pi_0}+\frac{b_1}{a_1}\left[\left(\frac{\tau_0}{\tau}\right)^2 e^{\frac{a_1}{a}\left(\frac{1}{\tau_0}-\frac{1}{\tau}\right)} - 1 + 2\tau_0^2 I_2\right]}, \quad (18)$$

причем I_2 теперь может быть точно выражено с помощью элементарных функций

$$I_2 = \int_{\tau_0}^{\tau} e^{\frac{a_1}{a}\left(\frac{1}{\tau_0}-\frac{1}{\tau}\right)} \frac{d\tau}{\tau^3} = e^{\frac{a_1}{a\tau_0}} \int_{\tau_0}^{\tau} \left(\frac{1}{\tau}\right) e^{\left(-\frac{a_1}{a}\right)\frac{1}{\tau}} d\left(\frac{1}{\tau}\right) =$$

$$= -e^{\frac{a_1}{a\tau_0}} \left\{ \frac{e^{\left(-\frac{a_1}{a\tau}\right)}}{\left(-\frac{a_1}{a}\right)^2}\left[\left(-\frac{a_1}{a}\right)\frac{1}{\tau} - 1\right]\right\}_{\tau_0}^{\tau} =$$

$$= \left(\frac{a}{a_1}\right)^2 \left[e^{\frac{a_1}{a}\left(\frac{1}{\tau_0}-\frac{1}{\tau}\right)}\left(\frac{a_1}{a\tau}+1\right)\right]_{\tau_0}^{\tau} = \left(\frac{a}{a_1}\right)^2 \left[\left(1+\frac{a_1}{a\tau}\right)e^{\frac{a_1}{a}\left(\frac{1}{\tau_0}-\frac{1}{\tau}\right)} - \left(1+\frac{a_1}{a\tau_0}\right)\right] =$$

$$= \frac{a}{a_1}\left[\left(\frac{a}{a_1}+\frac{1}{\tau}\right)e^{\frac{a_1}{a}\left(\frac{1}{\tau_0}-\frac{1}{\tau}\right)} - \left(\frac{a}{a_1}-\frac{1}{\tau_0}\right)\right].$$

Подставив это выражение в формуле (18), получим

$$\pi_x = \frac{\left(\frac{\tau_0}{\tau}\right)^2 e^{\frac{a_1}{a}\left(\frac{1}{\tau_0}-\frac{1}{\tau}\right)}}{\frac{1}{\pi_0}+\frac{b_1}{a_1}\left\{\left(\frac{\tau_0}{\tau}\right)^2 e^{\frac{a_1}{a}\left(\frac{1}{\tau_0}-\frac{1}{\tau}\right)} - 1 + 2\tau_0^2\left(\frac{a}{a_1}\right)\left[\left(\frac{a}{a_1}+\frac{1}{\tau}\right)e^{\frac{a_1}{a}\left(\frac{1}{\tau_0}-\frac{1}{\tau}\right)} - \left(\frac{a}{a_1}+\frac{1}{\tau_0}\right)\right]\right\}}. \quad (19)$$

Таблица 1

Расчет коэффициентов

$x_n=\pi_x$	$y_n=\pi_x \sqrt[k]{1-\pi_x^{\frac{k-1}{k}}}$	$x_n y_n$	$x_n^2 y_n$	$x_n^2=\pi_x^2$	$x_n^3=\pi_x^3$	$x_n^4=\pi_x^4$	$a_1\pi_x - b_1\pi_x^2$
0,972	0,0878	0,0853	0,0831	0,9448	0,9183	0,8930	0,090
0,950	0,118	0,112	0,107	0,9024	0,8574	0,8154	0,112
0,920	0,149	0,137	0,126	0,8464	0,7787	0,7157	0,136
0,885	0,173	0,153	0,136	0,7832	0,6932	0,6131	0,160
0,850	0,196	0,166	0,142	0,7225	0,6141	0,5227	0,181
0,810	0,206	0,167	0,137	0,6561	0,5314	0,4303	0,205
0,768	0,231	0,177	0,137	0,5898	0,4530	0,3481	0,225
0,727	0,237	0,172	0,125	0,5285	0,3842	0,2798	0,242
0,680	0,237	0,161	0,109	0,4624	0,3144	0,2134	0,257
0,646	0,254	0,164	0,106	0,4173	0,2696	0,1739	0,264
0,600	0,260	0,156	0,0938	0,3600	0,2160	0,1296	0,274
0,560	0,257	0,144	0,0810	0,3136	0,1756	0,0986	0,276
0,502	0,256	0,128	0,0648	0,2520	0,1265	0,0635	0,276
		$\sum x_n y_n = 1,9235$	$\sum x^2 y_n = 1,4262$	$\sum x_n^2 = 7,7691$	$\sum x_n^3 = 6,33138$	$\sum x_n^4 = 5,3071$	

$$a_1 = \frac{(x_n y_n)\left(\sum x_n^4\right) - \left(\sum x_n^2 y_n\right)\left(\sum x_n^3\right)}{\left(\sum x_n^2\right)\left(\sum x_n^4\right) - \left(\sum x_n^3\right)^2} = 1,03;$$

$$b_1 = \frac{\left(\sum x_n^2\right)\left(\sum x_n^2 y_n\right) - \left(\sum x_n y_n\right)\left(\sum x_n^3\right)}{\left(\sum x_n^2\right)\left(\sum x_n^4\right) - \left(\sum x_n^3\right)^2} = 0,959;$$

$$y_n = \pi_x \sqrt[K]{1-\pi_x^{\frac{K-1}{K}}} \approx 1,03\pi_x - 0,959\pi_x^2.$$

Коэффициенты a_1 и b_1 найдены по осциллограммам модели[1] молотка (см. рис. 1). Чтобы учесть противодавление и под величиной π_x принималось отношение результирующего индикаторного усилия к произведению Fp_0, причем рассматривался лишь участок наполнения t_{max} (см. рис. 1). Результаты сведены в табл. 1.

Формула (19) и является искомой зависимостью безразмерного давления от безразмерного времени. Вычисления по этой формуле следует считать законченными, если средняя величина безразмерного давления совпадет со средним ускорением $a_{ср}$, которым приходится задаваться (примерно 0,7).

Для проверки полученной формулы найдем работу удара РПМ-17-А, считая ОМ-506-Л его моделью. Для ОМ-506-Л по рис. 1 находим $t_{max} = 0{,}107$ *сек*,

$$\pi_0 = \frac{5{,}9 ama}{6{,}0 ama} = 0{,}985; \quad h_0 = 10 \text{ мм},$$

$$t_0 = \sqrt{\frac{mh_н}{Fp_0'}} = \sqrt{\frac{0.00196 \cdot 4{,}4}{32{,}8 \cdot 5{,}4}} = 0{,}007 \text{ сек},$$

где $p_0' = 6 - 0{,}6^* = 5{,}4$ *ama*;

$$A = \frac{0{,}825 \cdot 1{,}2}{32{,}8} \sqrt{2 \frac{1{,}41}{1{,}41 - 1} 8{,}3 \cdot 10^5 \frac{1{,}92}{32{,}8 \cdot 5{,}4 \cdot 4{,}4}} = 3{,}63.$$

Так как

$$\tau = \frac{t}{At_0}, \text{ то } \tau_0 = \frac{1}{A} = \frac{1}{3{,}63} = 0{,}276;$$

$$\tau_{max} = \frac{t_0 + t_{max}}{At_0} = \frac{0.007 + 0{,}0107}{3{,}63 \cdot 0{,}007} = 0{,}7.$$

Задаемся величиной $a \approx 0{,}75$.

Результаты вычислений π_x по формуле (19) приведены в табл. 2.

Таблица 2

Вычисление безразмерного давления π_x

Первое приближение		Второе приближение		Первое приближение		Второе приближение	
τ	π_x	τ	π_x	τ	π_x	τ	π_x
0,305	0,985	0,305	0,985	0,514	0,587	0,514	0,628
0,341	0,850	0,341	0,858	0,548	0,555	0,548	0,590
0,375	0,760	0,375	0,857	0,583	0,532	0,583	0,567
0,410	0,707	0,410	0,727	0.617	0,506	0.617	0,545
0,444	0,660	0,444	0,684	0,653	0,408	0,653	0,532
0,478	0,637	0,478	0,650				

Очевидно,

$$\pi_{x_{ср}} = \frac{\int_{\tau_0}^{\tau_m} \pi_x d\tau}{\tau_{max} - \tau_0}. \qquad (20)$$

[1] Молоток ОМ-506-Л условно считался моделью РПМ-17-А.

* Величина 0,6 — неучтенные потери давления.

Так как интеграл этого выражения не может быть в конечном виде выражен элементарными функциями, то найдем его приближенно по правилу Симпсона, которое дает наилучшую степень приближения

$$\int_a^b y dx \approx \frac{2}{3}\Delta x\left[\left(\frac{y_0+y_m}{2}+y_1+y_2+y_3+\ldots+y_{m-1}\right)+\right.$$
$$\left.+(y_1+y_3+y_5+\ldots+y_{m-1}\right]. \qquad (21)$$

Найденное по этой формуле значение интеграла $\int_{\tau_0}^{\tau_m}\pi_x d\tau$ можно подставить в уравнение (20) и найти $\pi_{x_{ср}}$. Вычисления можно несколько упростить. На основании теоремы о среднем

$$y_{ср}=\frac{1}{b-a}\int_a^b y dx.$$

Очевидно,

$$b-a=\Delta x m,$$

где m — число делений отрезка $b-a$.

Заменяя интеграл последнего равенства приближенным значением по формуле Симпсона, получим

$$y_{ср}=\frac{2}{3m}\left[\frac{(y_0+y_m)}{2}+y_1+y_2+y_3+\ldots+y_{m-1}\right)+$$
$$+(y_1+y_3+y_5+\ldots+y_{m-1})]. \qquad (22)$$

Подставив в формулу (22) значения π_x (см. табл. 2), получим $\pi^I_{x\,ср}=0{,}65$. Так как эта величина не совпадает с заданным в первом приближении безразмерным ускорением $a=0{,}75$, то проделаем по формуле (19) расчет во втором приближении, принимая теперь $a=\pi^I_{x\,ср}=0{,}65$ (см. табл. 2).

По формуле (22) и табл. 2 находим $\pi_{x_{ср}}=0{,}678$, что мало расходится с задаваемыми величинами среднего ускорения.

Работу удара с учетом противодавления $p_{н_{ср}}$ можно найти по формуле

$$L=\left(ap_0'-p_{н_{ср}}\frac{F_н}{F_в}\right)F_в h_н 10^{-2}, \qquad (23)$$

где $F_н$ — полезная площадь нижней камеры.

Для молотков типа ОМ-506-Л, как показывает обработка осциллограмм, $p_{н_{ср}}\approx 0{,}25p_0'$. Тогда для ОМ-506-Л (при $p_0=6$ *ата*, $L=$
$=(0{,}678\cdot 5{,}4-0{,}25\cdot 54\frac{21{,}9}{32{,}8})4{,}4\cdot 32{,}8\cdot 10^{-2}=3{,}99$ *кГм*.

По каталогу $L=4$ *кГм*.

Для РПМ-17-А можно принять $a\approx 0{,}678$. Тогда

$$L=\left(0{,}678\cdot 5{,}4-0{,}25\cdot 5{,}4\frac{16{,}9}{27{,}8}\right)\cdot 3\cdot 27{,}8\cdot 10^{-2}=2{,}37\ кГм.$$

По каталогу $L=2{,}5$ *кГм* (расхождение всего 5%).

В заключение покажем метод расчета основных размеров РПМ-17-А, если задано, что $L = 2{,}5$ *кГм*, т. е. решим обратную задачу проектировочного характера.

Из формулы (23) можно найти, например, полезную площадь и диаметр поршня.

За относительную единицу измерения линейных размеров примем величину *диаметра поршня*; *отношения основных размеров молотка* к диаметру поршня дадут безразмерную схему данного молотка. У подобных машин безразмерные схемы должны совпадать. Как видно из рис. 2 и табл. 3, для ОМ-506-Л и РПМ-17-А расхождение безразмерных схем составляет лишь 7—8%. Таким образом, умножая расчетную величину диаметра поршня (для РПМ-17-А) на параметры безразмерной

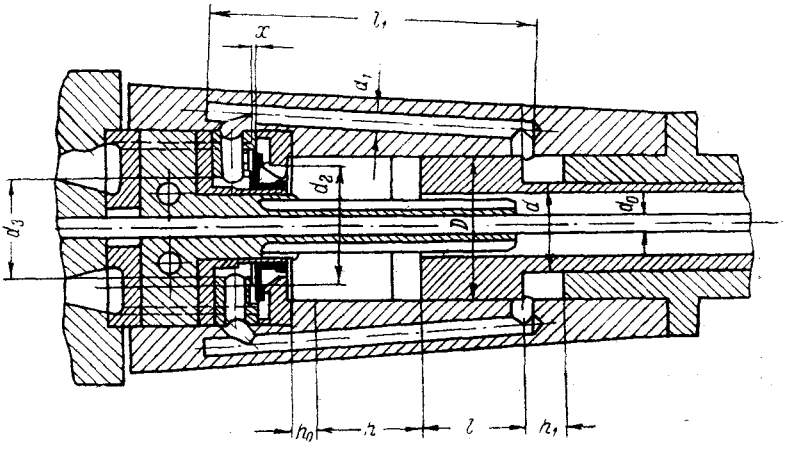


Рис. 2. Расчетная схема бурильного молотка РПМ-17-А

схемы модели ОМ-506-Л, получим основные расчетные размеры РПМ-17-А, почти совпадающие с действительными.

Таблица 3

Безразмерные схемы молотков

Бурильные молотки	D	d	l	d_1	l_1	d_0	d_2	d_3
Фактические размеры								
ОМ-506-Л	65	38	42	10	156	7	51	42
РПМ-17-А	60	38	40	10	133	7	47	38
Безразмерные величины								
ОМ-506-Л	1	0,585	0,646	0,154	2,40	0,108	0,785	0,646
РПМ-17-А	1	0,634	0,667	0,167	2,22	0.117	0,785	0,634
Расхождение подобия, %	—	7,8	3,2	7,8	7,5	7,8	0	1,8
Расчетные размеры								
РПМ-17-А	60	35	38,7	9,25	144	6,5	47	38,7
Расхождение подобия, %	0	8,0	3,3	7,5	7,7	7,7	0	1,8

Расход воздуха. Уравнение истечения воздуха в безразмерном виде

$$\lambda = A^2 \int_{\tau_0}^{\tau} \pi_x^{\frac{1}{n}} \sqrt{1 - \pi_x^{\frac{n-1}{n}}}\, d\tau, \tag{24}$$

где

$$\lambda = \frac{Q_x - Q_0}{Q_м - Q_0};$$

Q_x — переменное количество воздуха в объеме;

$Q_м - Q_0$ — количество воздуха, которое находилось бы в полном объеме наполнения при постоянной температуре,

$$Q_м - Q_0 = \frac{p_0 FH}{RT_0}, \tag{25}$$

где H — ход поршня.

Определение значений функции $y_n = \pi_x^{\frac{1}{n}} \sqrt{1 - \pi_x^{\frac{n-1}{n}}}$ произведено для рабочего (осциллограмма верхней камеры) и холостого ходов (осциллограмма нижней камеры) ОМ-506-Л. Вычисления производились для участка осциллограммы от начала хода до начала выхлопа (см. рис. 1).

Вычислим безразмерный расход воздуха для рабочего и холостого ходов.

По формуле (22) и табл. 4 среднее значение функции модели, т. е. ОМ-506-Л,

y_n для рабочего хода

$$y_{n_{ср\,р}} = 0{,}203;$$

для холостого хода

$$y_{n_{ср\,х}} = 0{,}256.$$

Очевидно,

$$\lambda_{max} = A^2 y_{n_{ср}} (\tau_{max} - \tau_0). \tag{26}$$

Подставляя найденные величины в формулу (26), получим максимальный безразмерный расход воздуха

рабочего хода

$$\lambda_{max.\,р} = 3{,}28^2 \cdot 0{,}203 \cdot 0{,}348 = 0{,}76;$$

холостого хода

$$\lambda_{max.\,х} = 3{,}28^2 \cdot 0{,}256 \cdot 0{,}348 = 0{,}96.$$

Для ОМ-506-Л при рабочем ходе

$$Q_м - Q_о = \frac{6 \cdot 32{,}8 \cdot 6{,}3}{8{,}5 \cdot 10^5} = \frac{1{,}46}{10^3}\ кг/удар;$$

$$Q_р = 0{,}76\, \frac{1{,}46}{10^3} \cdot \frac{1700}{1{,}29} = 1{,}47\ м^3/мин;$$

при холостом ходе объем каналов $г$

$$V_г = 2\, \frac{3{,}14}{4}\, 1^2 \cdot 15{,}6 = 24{,}5\ см^3;$$

$$Q_м - Q_0 = \frac{6\,(21{,}8 \cdot 6{,}3 + 24{,}5)}{8{,}5 \cdot 10^5} = \frac{1{,}145}{10^3}\ кг/удар;$$

$$Q_х = 0{,}96\, \frac{1{,}145 \cdot 1700}{10^3 \cdot 1{,}29} = 1{,}45\ м^3/мин.$$

Общий расход воздуха

$$Q = Q_р + Q_х = 1{,}47 + 1{,}45 = 2{,}92 \ м^3/мин.$$

На основании первой теоремы подобия для молотка РПМ-17-А можно также принять

$$\lambda_р = 0{,}76; \ \lambda_х = 0{,}96.$$

Следовательно, расход воздуха во время рабочего хода

$$Q_м - Q_0 = \frac{6 \cdot 27{,}8 \cdot 4{,}2}{8{,}5 \cdot 10^5} = \frac{0{,}845}{10^3} \ кг/удар;$$

$$Q_р = 0{,}76 \frac{0{,}845}{10^3} \frac{1700}{1{,}29} = 0{,}847 \ м^3/мин,$$

холостого хода

$$Q_м - Q_0 = \frac{6 (17 \cdot 4{,}2 + 20{,}9)}{8{,}5 \cdot 10^3} = \frac{0{,}652}{10^3} \ кг/удар;$$

$$Q_х = 0{,}96 \frac{0{,}652}{10^3} \frac{1700}{1{,}29} = 0{,}825 \ м^3/мин.$$

Общий расход воздуха

$$Q = 0{,}847 + 0{,}825 = 1{,}67 \ м^3/мин.$$

О выборе заменяющей функции для выражения y_n. Формулу (19) в частных случаях можно значительно упростить, если для замены значения y_n в качестве приближенной функции использовать не параболу $\beta\pi_x + \gamma\pi_x^2$, а прямую $\beta + \gamma\pi_x$ или же принять (для надкритического истечения) y_n как постоянную величину:

$$y_n = \pi_x^{\frac{1}{n}} \sqrt{1 - \pi_x^{\frac{n-1}{n}}} = \beta = \text{const}.$$

Табл. 4 свидетельствует о возможности такого режима истечения

Таблица 4

Вычисление y_n

Рабочий ход		Холостой ход		
Полость цилиндра				
верхняя		нижняя		
$x_n = \pi_x$	$y_n = \pi_x^{\frac{1}{K}} \sqrt{1 - \pi_x^{\frac{K-1}{K}}}$	$x_n = \pi_x$	$y_n = \pi_x^{\frac{1}{K}} \sqrt{1 - \pi_x^{\frac{K-1}{K}}}$	
0,977	0,0695	0,657	0,249	
0,960	0,102	0,590	0,260	
0,938	0,124	0,557	0,259	
0,910	0,1505	0,538	0,260	
0,877	0,173	0,513	0,260	
0,847	0,188	0,500	0,259	
0,810	0,206	0,490	0,258	
0,783	0,219	0,480	0,259	
0,753	0,226	0,467	0,257	
0,723	0,235	0,453	0,256	Надкритическая область
0,700	0,240	0,440	0,254	
0,674	0,243	0,433	0,254	
0,653	0,247	0,427	0,254	
0,633	0,255	0,417	0,251	
0,613	0,254	0,407	0,250	

При замене y_n прямой линией уравнение истечения запишется в виде

$$d\pi_x - \pi_x\left(\mu\beta\frac{f_x}{V_x} - \frac{dV_x}{d\tau}\frac{1}{V_x}\right)d\tau + \pi_x\mu\gamma\frac{f_x d\tau}{V_x} = 0$$

или

$$d\pi_x - \pi_x\left[\mu\frac{f_x}{V_x}(\beta+\gamma) - \frac{dV_x}{d\tau}\frac{1}{V_x}\right]d\tau = 0. \qquad (27)$$

Мы получили дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными, интеграл которого

$$\pi_x = \pi_0 e^{\int_{\tau_0}^{\tau}\left[\mu\frac{f_x}{V_x}(\beta+\gamma) - \frac{dV_x}{d\tau}\frac{1}{V_x}\right]d\tau}.$$

Очевидно,

$$\frac{dV_x}{V_x} = \frac{dx}{x} = \frac{d\frac{a\tau^2}{2}}{\frac{a\tau^2}{2}} = 2\frac{d\tau}{\tau},$$

поэтому

$$\pi_x = \pi_0 e^{-2\int_{\tau_0}^{\tau}\frac{d\tau}{\tau} + \mu(\beta+\gamma)\int_{\tau_0}^{\tau}\frac{f_x d\tau}{V_x}},$$

но как получено ранее, формула (12)

$$\varphi(\tau) = e^{\mu a_1\int_{\tau_0}^{\tau}\frac{f_x d\tau}{V_x}} = e^{\frac{a_1}{a}\left(\frac{1}{\tau_0}-\frac{1}{\tau}\right)}.$$

Аналогично

$$\pi_x = \pi_0 e^{2\ln\frac{\tau_0}{\tau}} e^{\left(\frac{\beta_1+\gamma_1}{a}\right)\left(\frac{1}{\tau_0}-\frac{1}{\tau}\right)},$$

так как

$$\beta = \beta_1\sqrt{2g\frac{n}{n-1}RT_0}; \quad \gamma = \gamma_1\sqrt{2g\frac{n}{n-1}RT_0}.$$

Учитывая, что

$$e^{2\ln\frac{\tau_0}{\tau}} = e^{\ln\left(\frac{\tau_0}{\tau}\right)^2} = \left(\frac{\tau_0}{\tau}\right)^2,$$

окончательно получим

$$\pi_x = \pi_0\left(\frac{\tau_0}{\tau}\right)^2 e^{\left(\frac{\beta_1+\gamma_1}{a}\right)\left(\frac{1}{\tau_0}-\frac{1}{\tau}\right)}. \qquad (28)$$

Новый метод расчета числа ударов

Запишем систему уравнений для расширения воздуха при рабочем ходе. Системы уравнений для остальных периодов аналогичны, поэтому критерии подобия, полученные из системы уравнений первого периода, справедливы в основном и для остальных периодов (учет влияния отскока поршня и работы поворотного устройства производится с помощью кривой числа ударов модели в зависимости от давления).

Введем две системы цилиндрических координат — для поршня и золотника. Началом координат первой системы будем считать точку, соответствующую крайнему верхнему положению поршня, второй систе-

мы — точку, соответствующую крайнему нижнему положению золотника.

Физические процессы рассматриваемой системы характеризуются уравнениями:

1) баланса энергии (по первому закону термодинамики)

$$dQi_2 = d(Q_r i) + d(Q_y i) + Ad\left[(p_в - p_н)V + \frac{w^2}{2g}\right]; \quad (29)$$

2) истечения

$$d\left(\frac{V}{v}\right) = \left\{\frac{\mu\pi db}{v}\sqrt{2g\frac{n}{n-1}R\tau_1\left[1-\left(\frac{p}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right]}\right\} - dQy; \quad (30)$$

3) движения золотника

$$dh = cd\tau; \quad (31)$$

4) движения поршня

$$m\frac{d^2S}{d\tau^2} = p_в F_в - p_н F_н \pm mg; \quad (32)$$

5) состояния

$$pv = RT, \quad (33)$$

где Q — количество воздуха, поступающего в цилиндр за конечный период времени, *кг*;

Q_y — утечки воздуха, *кг/мин*;

i — переменное теплосодержание воздуха, находящегося в полости цилиндра, *ккал/кг*;

i_1 — теплосодержание воздуха, находящегося перед золотниковой коробкой, *ккал/кг*;

V — переменный объем полости цилиндра, соответствующий произвольному перемещению поршня S, *см*^{3};

$\frac{w^2}{2g}$ — скоростной напор;

c — скорость золотника, *см/сек*;

d и h — диаметр и ход золотника, *см*.

Начальное условие может быть определено уравнением

$$|p_в - p_н|_{S=S_0} = p_0. \quad (34)$$

Из уравнения (29) получим критерий подобия. Для этого составим комплексы множителей

$$Q_р i_1;\ Q_y i_1;\ Q_р i;\ AVp_в;\ AVp_н;\ A\frac{w^2}{2g}.$$

Делением этих комплексов на первый комплекс получим критерии подобия

$$\frac{Q_y i_1}{Q_р i_1};\ \frac{Q_р i}{Q_р i_1};\ \frac{Q_y i}{Q_р i_1};\ \frac{AVp_в}{Q_р i_1};\ \frac{AVp_н}{Q_р i_1};\ \frac{Aw^2}{2gQ_р i_1}.$$

Пользуясь правилом замещения и учитывая, что

$$Q_р = \frac{V}{v},$$

заменим в первом критерии произвольный удельный объем v удельным объемом v_1, давление p давлением p_1 и объем V — совместным полезным объемом цилиндра и вредного пространства

$$V_0 = FS(1 + S_0').$$

Наконец, окончательно определим значение первого критерия

$$\frac{Q_y v_1}{FS(1+S_0')} = \frac{Q_y R T_1}{FS(1+S_0')p_1}.$$

Аналогично получим следующую систему критериев:

$$K_1 = \frac{Q_y R T_1}{p_1 FS(1+S_0)} = \text{idem};$$

$$K_2 = \frac{(c_p)_1 T_1}{i_1} = \text{idem};$$

$$K_3 = \frac{ART_1}{i_1} = \text{idem};$$

$$K_4 = \frac{Aw^2}{gQ_p i_1} = \text{idem};$$

$$K_5 = \frac{\mu dha_x \tau}{FS(1+S_0')} \sqrt{1-\left(\frac{p_{cp}}{p}\right)^{\frac{n-1}{n}}} = \text{idem},$$

где

$$a_x = \sqrt{ngRT_1};$$

$$K_6 = \frac{Q_1 R T_1}{FS(1+S_0')p_1} = \text{idem};$$

$$K_7 = \frac{c\tau}{h} = \text{idem};$$

$$K_8 = \frac{p_1 F \tau^2}{mS} = \text{idem};$$

$$K_9 = \frac{g\tau^2}{S} = \text{idem};$$

$$K_{10} = \frac{RT_1}{p_1 v_1} = \text{idem};$$

$$K_{11} = \frac{S_0}{S} = \text{idem};$$

$$K_{12} = \frac{p_0}{p_1} = \text{idem};$$

$$K_{13} = \frac{p_в - p_м}{p_1} = \text{idem (для отбойных молотков)};$$

$$K_{14} = \frac{p_в F_в - p_н F_н}{p_1 F_в} = \text{idem (для бурильных молотков)}.$$

Как следует из рассмотрения системы критериев, дальнейшее исследование можно построить на использовании критериев K_5, K_8 и K_{11}, так как они включают параметры, оказывающие наиболее существенное влияние на рабочий процесс. Эти параметры косвенно учитывают также потери от теплообмена и утечек воздуха, влияние работы поворотного устройства, отскока поршня, перекидки золотника, а также потери энергии на трение поршня о стенки цилиндра.

Обобщенная зависимость числа ударов поршня пневматических молотков. Так как система дифференциальных уравнений (30) и (32) точно решена быть не может, заменим ее системой критериальных уравнений, полученных из (30) и (32). Такая замена не изменит ко-

нечного числового результата решения уравнений, поскольку вид и число критериев не зависят от дифференциальных операторов.

Имеем систему

$$\left.\begin{aligned} K_8 &= \frac{p_1 F \tau^2}{mS} \\ K_5 &= \frac{\mu dha_x \tau}{FS(1+S_0)} \sqrt{1-\left(\frac{p_{cp}}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}} \\ K_{11} &= \frac{S_0}{S}; \quad \varepsilon = \text{const} \end{aligned}\right\}.$$

Исключая время τ и учитывая K_{11} и ε, получим

$$K_{11}\frac{K_5}{\sqrt{K_8}}\varepsilon = K = \left(\frac{S_0}{S}\right)\frac{\varepsilon\mu dha_x}{FS(1+S_0)} \times \times \sqrt{\frac{mS}{p_1 F}\left[1-\left(\frac{p_{cp}}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right]}\,^{*}.$$

Полученный новый критерий подобия K не содержит τ, но включает давление p_1. Так как

$$\tau_{cp} = \frac{\varepsilon}{n_{cp}},$$

поэтому

$$K_5 = \frac{\mu dha_x \varepsilon}{FS(1+S_0)\,n_{cp}} \sqrt{1-\left(\frac{p_{cp}}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}}; \qquad (35)$$

$$K = \frac{S_0 \varepsilon \mu dha_x}{FS(1+S_0)} \sqrt{\frac{mS}{p_1 F}\left[1-\left(\frac{p_{cp}}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right]}, \qquad (36)$$

где n_{cp} — среднее число ударов поршня.

Между определяющим критерием K и определяемым критерием K_5 должна существовать (как следует из теории подобия) функциональная зависимость

$$K_5 = f(K), \qquad (37)$$

которая для данной группы подобных молотков устанавливается на модели опытным путем. Имеем

$$\frac{\mu dha_x \varepsilon}{FS(1+S_0)n_{cp}} \sqrt{1-\left(\frac{p_{cp}}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}} = f\left\{\frac{S_0 \mu dha_x}{FS(1+S_0)} \times \times \sqrt{\frac{mS}{p_1 F}\left[1-\left(\frac{p_{cp}}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right]}\right\},$$

откуда получим

$$n_{cp} = \frac{\mu dh\varepsilon \sqrt{ngRT_1}\sqrt{1-\left(\frac{p_{cp}}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}}}{FS(1+S_0) f\left\{\left(\frac{S_0}{S}\right)\frac{\varepsilon\mu dh\sqrt{ngRT_1}}{FS(1+S_0)}\sqrt{\frac{mS}{p_1 F}\left[1-\left(\frac{p_{cp}}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right]}\right\}}. \qquad (38)$$

* Если здесь заменить m приведенной массой системы поршень-бур, то критерий K может быть применен для расчета крутящего момента.

По этой формуле и рекомендуется вычислять среднее значение числа ударов поршня.

В качестве примера найдем $n'_{ср}$ для молотка ОМ-506-Л, считая РПМ-17-А его моделью. Имеем

$$K_5 = \frac{40 \cdot 0{,}825 \cdot 4{,}72 \cdot 0{,}0525 \sqrt{1{,}41 \cdot 980 \cdot 8{,}3 \cdot 10^5}}{52 \cdot 27{,}8 \cdot 5{,}2n'} \times$$

$$\times \sqrt{1 - 0{,}75^{\frac{2}{7}}} = \frac{10{,}2}{n'}; \qquad (39)$$

$$K = \frac{10{,}2}{\sqrt{p_1}} \sqrt{\frac{1{,}66 \cdot 4{,}2}{980 \cdot 27{,}8}} \cdot \frac{10}{42} = \frac{0{,}0387}{\sqrt{p_1}}. \qquad (40)$$

Используя соотношения (40) и (39), можно построить для модели искомую критериальную зависимость (37) (табл. 5 и рис. 3).

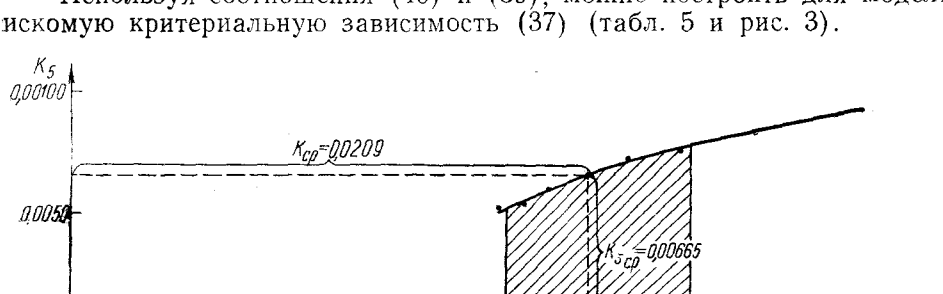


Рис. 3. Кривая числа ударов. Число ударов замерено при холостой работе. (По данным А. А. Тяхта)

При помощи кривой, приведенной на рис. 3, найдем $n'_{ср}$ для молотка ОМ-506-Л. Определим для этого молотка значение критерия

$$K = \frac{0{,}825 \cdot 5{,}12 \cdot 0{,}074 \cdot 34\,200 \cdot 0{,}272 \cdot 0{,}81}{32{,}8 \cdot 7{,}3 \sqrt{p_1}} \sqrt{\frac{1{,}92 \cdot 6{,}3}{980 \cdot 32{,}8}} \cdot \frac{10}{63} = \frac{0{,}0305}{\sqrt{p_1}}. \qquad (41)$$

Таблица 5

Критерии подобия K и K_5

p_1, *ати*	n', *удар/мин*		K		K_5
	РПМ-17-А	ОМ-506-Л	РПМ-17-А	ОМ-506-Л	РПМ-17-А
5,0	1950	2050	0,0173	0,0136	0,00523
4,5	1850	1900	0,0183	0,0144	0,00551
4,0	1700	1850	0,0193	0,0152	0,00600
3,5	1540	1750	0,0208	0,0163	0,00663
3,0	1420	1700	0,0224	0,0176	0,00720
2,5	1340	1550	0,0245	0,0193	0,00762
2,0	1240	1440	0,0276	0,0216	0,00823
1,5	1100	1200	0,0319	0,0250	0,00930

Как видно из табл. 5, где приведены числовые значения этого критерия, найденные по формуле (41) и рис. 3, подобие рабочих процессов молотков РПМ-117-А и ОМ-506-Л наблюдается лишь для значений критерия K в пределах 0,0176—0,250, т. е. кривая высоких давлений для

менее мощного молотка РПМ-17-А примерно совпадает с кривой низких давлений более мощного молотка ОМ-506-Л. Следовательно, режимы работы молотков РПМ-17-А и ОМ-506-Л, строго говоря, не могут считаться подобными (их безразмерные кривые при одинаковом давлении не совпадают). В указанных пределах они лишь аналогичны. Для этих значений критерия K можно определить среднее значение числа ударов для молотка ОМ-506-Л (который мы считаем проектируемым молотком).

1. Находим среднее значение критерия K (см. табл. 5)

$$K_{ср} = \frac{0{,}0176 + 0{,}0193 + 0{,}0216 + 0{,}0250}{4} = 0{,}0209.$$

2. По графику (рис. 3) для этого значения $K_{ср}$ находим соответствующее значение $K_{5ср} = 0{,}00665$.

3. Находим для молотка ОМ-506-Л формулу для K_5

$$K_5 = \frac{0{,}825 \cdot 5{,}12 \cdot 0{,}074 \cdot 3420}{32{,}8 \cdot 7{,}3 n'_{ср}} = 0{,}272 \cdot 0{,}81 = \frac{9{,}9}{n_{ср}}.$$

4. Приравниваем найденные значения $K_{5ср}$

$$\frac{9{,}9}{n'_{ср}} = 0{,}00665,$$

откуда

$$n'_{ср} = \frac{9{,}9}{0{,}00665} = 1485 \ \textit{удар/мин}.$$

Соответствующее опытное значение

$$n'_{ср} = \frac{1700 + 1550 + 1440 + 1200}{4} = 1473 \ \textit{удар/мин},$$

что почти совпадает с расчетным.

Упрощенный расчет бурильных молотков

Работа удара. В частных случаях формула (19) может быть значительно упрощена. Так, для молотков типа ОМ-506-Л можно принять $a_1 = b_1 = y_0 = 1$.

Учитывая, что

$$\tau_0 = \frac{1}{A}; \quad x = a_y \frac{\tau^2}{2} \text{ и } \tau_{max} = \frac{1}{A}\sqrt{\frac{2}{a_y}},$$

получим

$$a_y \approx \frac{(\pi_x)_0 + (\pi_x)_{max}}{2} =$$

$$= \frac{1}{2}\left[1 + \frac{\frac{a_y}{2} e^{\frac{1}{a_y}\left(A - A\sqrt{\frac{a_y}{2}}\right)}}{\frac{a_y}{2} e^{\frac{1}{a_y}\left(A - A\sqrt{\frac{a_y}{2}}\right)} + \frac{2}{A^2}\left(\frac{a_y}{a_1}\right)\left[\left(a_y + A\sqrt{\frac{a_y}{2}}\right) e^{\frac{1}{a_y}\left(A - A\sqrt{\frac{a_y}{2}}\right)} - (a_y + A)\right]}\right].$$

Пренебрегая членом $a_y + A$ и полагая $\frac{a_y}{a_1} \approx 1$, после несложных преобразований будем иметь

$$2a_y - 1 = \frac{\frac{a_y}{2}}{\frac{a_y}{2} + \frac{2}{A^2}\left(a_y + A\sqrt{\frac{a_y}{2}}\right)} = \frac{1}{1 + \frac{4}{A^2} + \frac{2}{A}\left(\frac{2}{\sqrt{2a_y}}\right)} \approx$$

$$\approx \frac{1}{1 + \frac{4}{A^2} + \frac{2}{A}} = \frac{A^2}{(A+2)^2};$$

откуда

$$a_y = 0{,}5\left[\left(\frac{A}{A+2}\right)^2 + 1\right]. \tag{42}$$

Для молотка ОМ-506-Л

$$a_y = 0{,}5\left[\left(\frac{3{,}63}{3{,}63+2}\right)^2 + 1\right] = 0{,}707.$$

Работа удара при 6 *ата*

$$L = \left(0{,}707 \cdot 5{,}4 - 0{,}25 \cdot 5{,}4\,\frac{21{,}8}{32{,}8}\right) \cdot 4{,}4 \cdot 32{,}8 \cdot 10^{-8} = 4{,}22\ кГм.$$

Расхождение с каталожными данными (4 *кГм*) всего 5%.

Расход воздуха. Эмпирическая формула определения безразмерного расхода воздуха λ_{max} справедлива только для отбойных молотков [2]. Аналогичная зависимость может быть получена для бурильных молотков следующим образом. Безразмерное давление по аналогии с давлением в работе И. С. Кассациера [2]

$$y = (1 - 2a_y^2\tau^2)^{\frac{n}{n-1}}. \tag{43}$$

Принимая $\frac{n}{n-1} \approx 4$ и интегрируя выражение (24) с помощью формулы (43), получим

$$\lambda_{max} = 0{,}4\,\frac{\alpha}{a_y}\left[1 - \left(1 - \frac{a_y}{\alpha}\right)^4\right], \tag{44}$$

где $\alpha = \frac{A^2}{4}$.

Расход воздуха по эмпирической формуле

$$Q = 1{,}1\,\frac{n'}{\gamma}\,\lambda_{max}(Q_м - Q_0), \tag{45}$$

где n' — число ударов бойка в 1 мин.;

γ — удельный вес воздуха.

Найдем расход воздуха молотка ОМ-506-Л

$$Q_м - Q_0 = \frac{p_0 F_в h_м}{RT_0};$$

$$Q_м - Q_0 = \frac{6 \cdot 32{,}8 \cdot 6{,}3}{8{,}3 \cdot 10^5} = \frac{1{,}50}{10^3}\ кг/удар;$$

$$\alpha = \frac{A^2}{4} = \frac{3{,}63^2}{4} = 3{,}3;$$

$$\lambda_{max} = 0{,}4\,\frac{3{,}3}{0{,}707}\left[1-\left(1-\frac{0{,}707}{3{,}3}\right)^4\right] = 1{,}15;$$

$$Q = 1{,}1\,\frac{1700}{1{,}29}\,1{,}15\,\frac{1{,}50}{10^3} = 2{,}5\ м^3/мин.$$

По каталогу $Q = 2{,}4\ м^3/мин$.

Число ударов. Число ударов бойка в 1 *мин* можно определить приближенно по преобразованной нами формуле Б. В. Суднишникова [6]

$$n' = \frac{60}{K_п}\sqrt{\frac{2F_в\,(a_y p_0 - 1)}{mH}}, \qquad (46)$$

где $K_п$ — коэффициент, учитывающий влияние параметров молотка, примерно равный 4,65.

Для молотка ОМ-506-Л

$$n' = \frac{60}{4{,}65}\sqrt{\frac{2\cdot 32{,}8\,(0{,}707\cdot 6-1)}{0{,}00196\cdot 6{,}3}} = 1690\ удар/мин.$$

По каталогу $n' = 1700\ удар/мин$.

Крутящий момент. Определим максимальный крутящий момент по эмпирической формуле

$$M = k_1 p_0 F_н R_с \operatorname{tg}\beta, \qquad (47)$$

где p_0 — давление в подводящем шланге, *атм*;

β — угол подъема нарезки геликоидального стержня, *град*;

$R_с$ — радиус геликоидального стержня, *см*;

k_1 — эмпирический коэффициент, равный $8 \div 10$.

Результаты расчета приведены в табл. 6.

Таблица 6

Результаты упрощенного расчета некоторых бурильных молотков

Тип молотка	Параметры молотков							
	Работа удара, *кГм*		Число ударов, *удар/мин*		Расход воздуха, $м^3/мин$		Крутящий момент, *кГсм*	
	по формулам (5), (23), (42)	фактически	по формуле (46)	фактически	по формулам (44), (45)	фактически	по формуле (47)	фактически
ПА-23	3,6	3,5	1860	1875	2,4	2,3—2,5	100	85
ПР-35	4.8	5,0	1640	1690	3,3	2,6—2,9	110	120
ПРС-3М	3,7	3,5—4,0	2940	3000—3100	3,7	3,5—3,8	220	215
ПРС-4	4,0	4,0	2550	2550	3,8	3,8	240	240
ПР-20	3,3	3,5	2700	2750	3,8	3,2	120	110

Примечание. Конструктивные размеры взяты по рабочим чертежам молотков. Значения постоянных: $\mu = 0{,}825$; $K = 1{,}41$; $RT_0 = 8{,}3\cdot 10^5$.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Есин Н. Н. Исследование легких бурильных молотков. Канд. диссертация. Рукопись. Фонды ЗСФАН СССР, 1948.

2. Кассациер И. С. Теория и расчет строительных пневматических инструментов. Научн. тр. ЛИСИ, 1950, вып. 9.

3. Глаголев Н. М. Рабочие процессы двигателей внутреннего сгорания. Машгиз, 1950.

4. Филиппов В. В., Евенко В. И. Процессы впуска и выпуска в паровых машинах. Машгиз, 1955.

5. Мостков В. М. Основы теории пневматического бурения. Углетехиздат, 1952.

6. Суднишников Б. В. Некоторые зависимости, вытекающие из особенностей индикаторных диаграмм пневматических молотков. Сб. «Машины ударного действия». Изд-во ЗСФАН СССР, 1953.