Доклады Академии Наук СССР
1950. Том LXXI, № 5

МЕХАНИКА

И. С. КАССАЦИЕР

ТЕОРИЯ И РАСЧЕТ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ МАШИН УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ С ЗОЛОТНИКОВЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ

(Представлено академиком А. И. Некрасовым 12 XI 1949)

Как известно, до настоящего времени теория и расчеты пневматических машин ударного действия с золотниковым распределением (пневмомолотков) исходят из того основного положения, что давление воздуха в цилиндре постоянно ([1,2] и др.). Это положение неточно с теоретической точки зрения, опровергается экспериментально и приводит к значительным ошибкам при практическом проектировании.

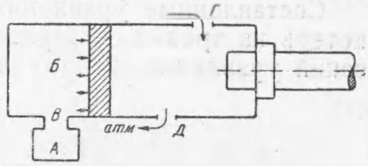

Рис. 1

Ниже излагаются теория и методы расчета пневмомолотков, учитывающие переменность давления по ходу поршня и рассматривающие процесс как протекающий с изменяющейся температурой.

Рассмотрим схему работы молотка (рис. 1). Сжатый воздух из резервуара A через отверстие B попадает в пространство над поршнем $Б$ и гонит поршень вниз. Поршень, двигаясь ускоренно, приобретает живую силу, которую и отдает в момент удара о торец орудия. Вследствие того, что в момент удара сработает не указанное на схеме золотниковое распределение, воздух, попадавший ранее в полость над ударником через отверстие B, теперь в момент удара начинает попадать через отверстие $Г$ в полость под ударником и погонит его вверх, начнется холостой ход. Когда ударник дойдет опять до верхней мертвой точки, сработает золотник, ударник погонится вниз и, таким образом, цикл повторится. Через отверстие $Д$ воздух выбрасывается в атмосферу.

Сопоставим дифференциальные уравнения процессов, происходящих в цилиндре пневмомолотка. Таких уравнений можно составить четыре: уравнение состояния, уравнение движения поршня, уравнение истечения и уравнение баланса энергии.

Введем следующие обозначения: p — переменное давление в цилиндре; s — площадь поршня; v — переменный объем воздуха; h — переменный путь поршня; g_x — переменное количество воздуха; m — масса поршня; T — переменная температура; f — входное сечение; p_0 — начальное давление перед входом; g — ускорение силы тяжести; $p_н$ — давление в нижней камере, сообщающейся с атмосферой, равное $\sim 1{,}03$ кГ / см²; h_m — теоретический максимальный путь наполнения; c_v — теплоемкость при постоянном объеме; q — вес поршня; h_0 — мертвое пространство; T_0 — температура в резервуаре; R — газовая постоянная для воздуха; μ — коэффициент истечения; k — показатель политропы истечения; T' — температура в момент входа.

Обозначим через A следующее выражение, которое содержит некоторые константы процесса и параметры молотка

$$A = \frac{\mu f}{s} \sqrt{2g \frac{k}{k-1}} \sqrt{RT_0} \sqrt{\frac{m}{sp_0 (h_m - h_0)}}. \quad (1)$$

Тогда дифференциальные уравнения процесса примут вид: уравнение состояния:

$$pv = g_x RT; \quad (2)$$

уравнение движения поршня:

$$m \frac{d^2 h}{dt^2} = sp + q - p_н s; \quad (3)$$

уравнение истечения:

$$\frac{dg_x}{dt} = \mu f \sqrt{2g \frac{k}{k-1} \frac{p_0}{v_0} \left[\left(\frac{p}{p_0}\right)^{2/k} - \left(\frac{p}{p_0}\right)^{(k+1)/k} \right]}; \quad (4)$$

уравнение баланса:

$$-g_x c_v dT = p\,dv + dg_x c_v (T - T'). \quad (5)$$

Составленные уравнения рассматривают протекающий процесс без потерь на трение и теплообмен. В результате некоторых преобразований уравнения (2)—(5) можно представить в таком виде:

$$pv = g_x RT; \quad (2')$$

$$\frac{d^2 h}{dt^2} = \frac{s}{m} (p - p_н) + g; \quad (3')$$

$$\frac{dg_x}{dt} = \mu f \sqrt{2g \frac{k}{k-1}} \frac{p_0}{\sqrt{RT_0}} \sqrt{\left(\frac{p}{p_0}\right)^{2/k} - \left(\frac{p}{p_0}\right)^{(k+1)/k}}; \quad (6)$$

$$kp \frac{dh}{dt} + h \frac{dp}{dt} = \frac{\mu f}{s} \sqrt{2g \frac{k}{k-1}} p_0 \sqrt{RT_0} \left(\frac{p}{p_0}\right)^{(k-1)/k} \sqrt{\left(\frac{p}{p_0}\right)^{2/k} - \left(\frac{p}{p_0}\right)^{(k+1)/k}}. \quad (7)$$

Для интегрирования уравнений (3) и (7) введем следующие безразмерные величины:

1) безразмерное давление:

$$y = \frac{p}{p_0}; \quad (8)$$

2) безразмерный путь:

$$x = \frac{h - h_0}{h_m - h_0} \frac{1}{A^2}; \quad (9)$$

3) безразмерное время:

$$\tau = \frac{t}{At_0}, \quad (10)$$

где

$$t_0 = \sqrt{\frac{m (h_m - h_0)}{sp_0}}; \quad (11)$$

4) отношение давления в полости, сообщающейся с атмосферой, к начальному давлению

$$B = \frac{p_н}{p_0}.$$

Тогда уравнения (3) и (7) в безразмерном виде напишутся так:

$$\frac{d^2x}{d\tau^2} = y - B; \tag{12}$$

$$1{,}4\, y \frac{dx}{d\tau} + (x + \beta)\frac{dy}{d\tau} = y\sqrt{1 - y^{2/7}}; \tag{13}$$

здесь $\beta = \frac{h_0}{h_m - h_0}\frac{1}{A^2}$, а $k \simeq 1{,}4$.

Так как путь наполнения сравнительно велик, а падение давления на этом пути относительно невелико, то можно положить, что член $(x + \beta)\, dy/d\tau$ мал сравнительно с членом $1{,}4y\, dx/d\tau$ (что подтверждается расчетами на практически выполненных конструкциях). Кроме того, положим, что $y - B = a_y$ — некоторое усредненное постоянное ускорение, обеспечивающее поршню в конце наполнения такую же живую силу, какую он имеет на самом деле. Тогда уравнения (12) и (13) легко проинтегрировать. В результате интегрирования в первом приближении получим:

безразмерный путь:

$$x = a_y \frac{\tau^2}{2}; \tag{14}$$

безразмерное давление:

$$y = \sqrt{(1 - 2a_y^2\tau^2)^7}. \tag{15}$$

Используя (14) и (15), можно рассчитать и работу в конце наполнения

$$L = a_y s p_0 (h_m - h_0). \tag{16}$$

Так как в ударных молотках с золотниковым распределением путь выхлопа мал сравнительно с путем наполнения и учитывая, что перекидка золотника происходит в моменты времени, близкие к удару, можно положить, что за время выхлопа скорость поршня меняется мало. Тогда (16) и представляет выражение для работы в момент удара поршня о торец рабочего инструмента. Величина a_y — коэффициент, который показывает, насколько работа удара падает из-за падения давления по ходу поршня. Назовем a_y коэффициентом мощности. Ясно, что коэффициент мощности a_y является функцией от параметров машины. Исследование показывает, что можно найти достаточно точное выражение для a_y в функции параметров машины:

$$a_y = 0{,}8\frac{A^2}{A^2 + 3{,}84}; \tag{17}$$

здесь A взято из (1).

По такому же методу можно рассчитать и теоретический расход воздуха. Он оказывается равным:

$$v = \frac{1{,}4\,(g_м - g_0)\,\lambda_m\, h}{\gamma}; \tag{18}$$

здесь $g_м - g_0$ — количество воздуха, которое находилось бы в объеме наполнения, если не было бы изменения температуры; λ_m — максимальный безразмерный расход воздуха за период наполнения, равный

$$\lambda_m = 0{,}5\,(\alpha + 0{,}96)\left[1 - \sqrt{\left(1 - \frac{0{,}8}{\alpha + 0{,}96}\right)^7}\,\right]; \qquad (19)$$

$\alpha = A^2/4$; n — число ударов в минуту; $\gamma = 1{,}293$; 1,4 — принятый нами коэффициент, учитывающий расход воздуха за холостой ход.

Для проверки правильности предложенной теории и методов расчета мы произвели расчет всех пневмомолотков, выпускаемых заводом „Пневматика“, и сравнили расчетные данные по формулам (16) и (18) с экспериментальными данными, взятыми из каталога. Сравнение этих данных (см. табл. 1) показывает, что между ними имеется достаточно близкое совпадение.

Таблица 1

Тип молотка	Расчетная работа удара в кГ·м	Коэффициент мощности	Работа удара по каталогу завода в кГ·м	Теоретический расход воздуха в м³/мин.	Расход воздуха по каталогу в м³/мин.	Число ударов в мин.
Отбойный ОМСП5	4,0	0,68	3,5—4,0	0,92	1,0	950—1000
Клепальный КМ3	3,1	0,71	3,3—3,2	0,77	0,9	1200
Рубильный РМ5	2,5	0,62	2,6	0,57	0,6	1000
Рубильный РМ3	1,75	0,63	1,6—1,7	0,535	0,6	1300
Рубильный РМ1	1,07	0,63	1,1	0,77	0,6	2260

Ленинградский инженерно-строительный институт

Поступило 12 XI 1949

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

[1] Ю. М. Малахов, Горн. журн., № 2 (1934). [2] П. С. Кучеров, Уголь, № 93 (1933). [3] А. П. Герман, Использование энергии сжатого воздуха в горном деле, 1933.