



ПИТАННЯ ДИНАМІКИ ПНЕВМАТИЧНИХ ПЕРФОРАТОРІВ

Р.К. Прилепський, Е.С. Савенко, С.В. Крахін, Р.І. Рибалко

Донбаська національна академія будівництва і архітектури

вул. Державіна 2, м. Макіївка, Україна, 86123.

e-mail: spgs@mail.ru

Отримана 12 лютого 2009; прийнята 21 березня 2009.

Анотація. У статті викладені результати досліджень динаміки пневматичних перфораторів на основі системи диференціальних рівнянь термодинаміки тіла змінної маси і динаміки поршня. Детальний аналіз показує, що змінність маси термодинамічного тіла має місце в робочому процесі пневматичного перфоратора і робить безперечний вплив на характер процесу, що і визначає вибір системи вихідних рівнянь. Приведені системи рівнянь не мають загального рішення, але мають окремі випадки рішення, що представляють інтерес при теоретичному дослідженні робочого процесу. Розроблений метод порівняння пневматичних перфораторів за принципом подібності (отримані критерії подібності), що дозволяє результати одиничних досліджень розповсюдити на весь типорозмірний ряд. В даний час методи розрахунку повітродозподільних пристроїв перфораторів розроблені недостатньо детально, причому розглянуті в основному питання статички, що не дозволяє проаналізувати робочі процеси з урахуванням динаміки і термодинаміки повітродозподільних пристроїв, а отже і з погляду теорії подібності. З метою розробки методу руху клапана, що дозволяє розрахувати передбачуваний графік, запропоновані диференціальні рівняння, що характеризують робочий процес найбільш поширених типів повітродозподільних пристроїв пневмомолотків і вказані методи їх рішення.

Ключові слова: перфоратор, поршень, динаміка, рівняння, критерій, клапан, термодинаміка, тиск, маса.

ВОПРОСЫ ДИНАМИКИ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ПЕРФОРАТОРОВ

Р.К. Прилепский, Э.С. Савенко, С.В. Крахин, Р.И. Рыбалко

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

ул. Державина 2, г. Макеевка, Украина, 86123.

e-mail: spgs@mail.ru

Получена 12 февраля 2009; принята 21 марта 2009.

Аннотация. В статье изложены результаты исследований динамики пневматических перфораторов на основе системы дифференциальных уравнений термодинамики тела переменной массы и динамики поршня. Детальный анализ показывает, что изменяемость массы термодинамического тела имеет место в рабочем процессе пневматического перфоратора и оказывает несомненное влияние на характер процесса, что и определяет выбор системы исходных уравнений. Приведенные системы уравнений не имеют общего решения, но имеют частные случаи решения, представляющие интерес при теоретическом исследовании рабочего процесса. Разработан метод сравнения пневматических перфораторов по принципу подобия (получены критерии подобия), позволяющий результаты единичных исследований распространить на весь типоразмерный ряд. В настоящее время методы расчета воздухораспределительных устройств перфораторов разработаны недостаточно детально, причём рассмотрены в основном вопросы статички, что не позволяет проанализировать рабочие процессы с учётом динамики и термодинамики воздухораспределительных устройств, а следовательно и с точки зрения теории подобия. С целью разработки метода, позволяющего рассчитать предполагаемый график движения клапана предложены дифференциальные

уравнения, характеризующие рабочий процесс наиболее распространенных типов воздухораспределительных устройств пневмомолотков и указаны методы их решения.

Ключевые слова: перфоратор, поршень, динамика, уравнение, критерий, клапан, термодинамика, давление, масса.

QUESTIONS OF PNEUMATIC PERFORATORS DYNAMICS

R.K. Prilepskij, E.S. Savenko, S.V. Krakhin, R.I. Rybalko

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

Derzhavin str. 2, Makeyevka, Ukraine, 86123.

e-mail: spgs@mail.ru

Received 12 February 2009; accepted 24 March 2009.

Abstract. In the article the results of pneumatic perforators dynamics researches have been stated on the basis of differential equations system of variable mass body thermodynamic and the dynamic piston. The detailed analysis shows that the changeability of thermodynamic body mass takes place in the working process of pneumatic perforator and undoubted by influences on the character process, which determines the initial equalization system choice. The given equations systems do not have the general solution, but they have private of solution, being of interest in theoretical research of working process. The method of pneumatic perforators comparison has been worked out on the principle of similarity (the criteria of similarity are obtained), allowing to spread the single researches results on all types of the size row. At present calculation the methods of air distributed devices for perforators have been worked out not in enough detail, and the static's questions have mainly been considered, that does not allow to analyze workings processes taking into account the dynamics and thermodynamics of air distributed devices, and hence from the point of the similarity theory. With the purpose of the method elaborations, which allows calculating of the supposed graph of valve motion the differential equations have been suggested, characterizing the working process of the most widespread types of air distributive devices of pneumatic hammers, and indicated the methods of their solution.

Keywords: perforator, piston, dynamics, equalization, criterion, valve, thermodynamics, pressure, mass.

Введение

Возведение сооружений в горном массиве, а также проходка тоннелей в скальных породах невозможны без буровых работ, бурение скважин для которых осуществляется в большинстве случаев пневматическими перфораторами.

Поступательное движение бурового инструмента осуществляется поршневым пневмодвигателем, а независимое вращение бура – ротационным. Несмотря на значительные успехи в исследовании внутренних процессов, отдельные вопросы теории и расчетов изучены недостаточно полно:

- динамика внутренних процессов описывалась уравнением состояния, что недостаточно достоверно отображает процесс;
- внутренние процессы рассматривались без использования аппарата теории подобия;

– исследования воздухораспределительных устройств перфораторов выполнялись в основном методами статики.

Цель и постановка задачи

Целью исследований является разработка математической модели, достоверно описывающей рабочие процессы перфораторов, получение на основе этой модели комплекса критериев подобия, разработка модели рабочих процессов наиболее распространенных воздухораспределительных устройств пневмомолотков.

В основу разработки положена система дифференциальных уравнений термодинамики тела переменной массы и динамики поршня, позволяющие изучить режимы работы перфораторов, при которых происходит либо втекание, либо вытекание сжатого воздуха из

цилиндра, либо и то и другое, и на основании этого получение из этих уравнений комплекса критериев подобия.

В основу разработки математической модели воздухораспределительных устройств положен принцип Даламбера.

Решение задачи. Уравнение термодинамики тела переменной массы

Для математического описания рабочих процессов пневматических перфораторов используют систему дифференциальных уравнений [1,2]. Безразмерное дифференциальное уравнение энергетического баланса:

$$k\varepsilon d\zeta + (\zeta + \zeta_1)d\zeta = k\varphi(\varepsilon)d\tau \quad (1)$$

Безразмерное дифференциальное уравнение движения поршня:

$$\frac{d^2\zeta}{d\tau^2} = \frac{\varepsilon - \varepsilon_a}{N^2} \quad (2)$$

где k – показатель адиабаты;

ζ и ζ_1 – безразмерный объем рабочей камеры и безразмерный объем воздушной подушки перфоратора;

ε и ε_a – безразмерное давление в рабочей камере и безразмерное атмосферное давление;

τ – безразмерное время;

$$\varphi(\varepsilon) = \sqrt{\frac{2}{\varepsilon^k - \varepsilon_a^k} - \frac{k+1}{k}}$$

скоростная функция истечения для подкритического режима;

N – постоянное число, включающее в себя основные параметры перфоратора, играющее роль критерия подобия (см. ниже).

Указанная система уравнений может лишь приближенно характеризовать рабочий процесс перфораторов, т.к. в неё в явном виде не входят утечки воздуха, она не способствует построению теоретической осциллограммы изменения температуры сжатого воздуха в течении всего цикла, что затрудняет расчёт шума выхлопа и некоторых других параметров.

Недостатки системы уравнений (1) и (2) могут быть устранены, если при описании рабочих процессов воспользоваться системой дифференциальных уравнений термодинамики тела переменной массы [3,4].

$$\frac{dP}{dt} = \frac{kP}{V} \left[\frac{R}{P} (T_{II}G_{II} - TG_p) - \frac{dV}{dt} \right], \quad (3)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T}{V} \left\{ \frac{R}{P} [G_{II}(kT_{II} - T) - TG_p(k-1)] - (k-1) \frac{dV}{dt} \right\}, \quad (4)$$

$$m_{II} \frac{d^2S}{dt^2} = F(P - P_a). \quad (5)$$

Для дальнейших исследований уравнение (4) удобнее записать в следующем виде:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T}{V} \left\{ \frac{R}{P} \left[k(G_{II}T_{II} - G_pT) - T(G_{II} - G_p) - (k-1) \frac{dV}{dt} \right] \right\} \quad (6)$$

где T, P и V – переменные температура, давление и объём воздуха в рабочей камере;

R – газовая постоянная;

T_{II} – температура;

G_{II} – секундный приток сжатого воздуха в рабочую камеру;

G_p – секундный расход сжатого воздуха из рабочей камеры;

m_{II} – масса поршня перфоратора;

S, F – ход и площадь поршня перфоратора.

Использование уравнений (3) и (4) в отличие от уравнений (1) и (2) позволяет вместо линейной величины S применить объёмную величину V и V_0 , где V_0 – объём воздушной подушки, что поможет уточнить расчёт параметров процесса, для этого уравнение (5) запишем в виде:

$$m_{II} \frac{d^2V}{dt^2} = F^2 (P - P_a) \quad (7)$$

Для удобства решения системы уравнений (3), (4), (7) по аналогии с работой [1] эта система приводится к безразмерному виду, для этого вводятся безразмерные величины:

$$\zeta = \frac{V - V_0}{V - V_m}, \quad (8)$$

где V_m – объём камеры молотка, соответствующий участку до начала открытия выхлопных отверстий.

$$\tau = \frac{t}{t_m} N; \quad \eta = \frac{T}{T_{II}}; \quad t_m = \frac{1}{F} \sqrt{\frac{m(V_m - V_0)}{P_{II}}}; \quad (9)$$

$$\varepsilon = \frac{P}{P_{II}}; \quad \varepsilon_a = \frac{P_a}{P_{II}}; \quad \zeta_1 = \frac{V_0}{V_m - V_0};$$

$$N = \frac{\mu f}{F} \sqrt{\frac{2kgm_{II}RT_{II}}{P_{II}(k-1)(V_m - V_0)}},$$

где t_m – время, соответствующее началу открытия выхлопных отверстий;

η – безразмерная переменная температура воздуха в рабочей камере перфоратора;

g – ускорение свободного падения;

f_1 и f_2 – площадь впуска или выпуска;

j_1 и j_2 – коэффициенты расхода впуска и выпуска.

Предполагая, что расход воздуха из камеры молотка происходит при надкритическом режиме истечения и, обозначив скоростную функцию истечения для надкритического режима через $\mathcal{J}_*(\mu)$ после определенных преобразований получим безразмерную форму системы (3), (4).

$$\kappa \mu ds + (s+s_0) d\mu = \kappa [j(\mu) - j(\mu)s] dt \quad (10)$$

$$\frac{\varepsilon}{\eta} (\xi + \xi_0) d\eta + \varepsilon(\kappa-1) d\xi = [(\kappa-\eta)\varphi(\varepsilon) - \eta(\kappa-1)\varphi^*(\varepsilon)] dt \quad (11)$$

Критерии подобия, характеризующие рабочий процесс перфораторов

Предшествующие работы, в которых рассматривались критерии подобия, имеют тот недостаток, что в них не учтены следующие факторы:

- сила нажатия и масса корпуса;
- в критерии подобия не входит температура сжатого воздуха в рабочей камере и величина утечек.

Эти недостатки можно устранить более полным математическим описанием рабочего процесса – системой уравнений термодинамики тела переменной массы, уравнением динамики поршня [5,6], клапана, корпуса перфоратора.

$$m_n \frac{d^2 S}{dt^2} = F(P - P_a); \quad (12)$$

$$m_1 \frac{d^2 h}{dt^2} = Q, \quad (13)$$

где m_1 – масса клапана;

h – ход клапана;

Q – индикаторная сила, действующая на клапан.

$$M'_1 \frac{d^2 y}{dt^2} = F(P - P_a) - P', \quad (14)$$

где M'_1 – масса корпуса перфоратора;

P' – усилие нажатия на рукоятку перфоратора;

y – путь корпуса.

Перед выводом критериев подобия преобразуем эти уравнения к более удобному виду, учитывая, что $V=FS$, получим:

$$\frac{FS}{kP} \frac{dP}{dt} = \frac{RT_{II} G_{II}}{P} - \frac{RT G_P}{P} - F \frac{dS}{dt}; \quad (15)$$

$$\frac{FS}{T} \frac{dT}{dt} = \frac{RT_{II} k G_{II}}{P} - \frac{RT G_P}{P} - \frac{RT k G_P}{P} + \frac{RT G_P}{P} - F(k-1) \frac{dS}{dt}. \quad (16)$$

Известным методом получим критерии подобия, отбрасывая в каждом уравнении знаки дифференцирования, получим следующие комплексы:

– из уравнения (15):

$$\frac{FSP}{kPt} = \frac{FS}{kt}, \frac{RT_{II} G_{II}}{P}, \frac{RT G_P}{P}, \frac{FS}{t},$$

– из уравнения (16):

$$\frac{FST}{Tt} = \frac{FS}{t}, \frac{RT_{II} k G_{II}}{P}, \frac{RT G_P}{P}, \frac{RT k G_P}{P},$$

$$\frac{RT G_P}{P}, \frac{F(k-1)S}{t};$$

– из уравнения (12):

$$\frac{m_n S}{t^2};$$

– из уравнения (13):

$$\frac{m_1 h}{t^2}; Q;$$

– из уравнения (14):

$$\frac{M'_1 y}{t^2}; P'.$$

Разделив все комплексы каждой группы, например, на первый комплекс данной группы, получим обобщенную совокупность критериев подобия.

$$k_1 = \frac{ktRT_{II}G_{II}}{FSP} = idem \quad (17)$$

$$k_2 = \frac{ktRTG_P}{FSP} = idem \quad (18)$$

$$k_3 = k = idem \quad (19)$$

$$k_4 = \frac{tRG_{II}kT_{II}}{FSP} = idem \quad (20)$$

$$k_5 = \frac{tRG_{II}T}{FSP} = idem \quad (21)$$

$$k_6 = \frac{tRTG_P k}{FSP} = idem \quad (22)$$

$$k_7 = \frac{tRTG_P}{FSP} = idem \quad (23)$$

$$k_8 = k - 1 = idem \quad (24)$$

$$k_9 = \frac{Ft^2(P - P_a)}{m_n S} = idem \quad (25)$$

$$k_{10} = \frac{Qt^2}{m_1 h} = idem \quad (26)$$

$$k_{11} = \frac{Ft^2(P - P_a)}{M_1' y} = idem \quad (27)$$

$$k_{12} = \frac{P't^2}{M_1' y} = idem \quad (28)$$

Анализ полученной совокупности критериев подобия показывает, что критерий k_4 является лишним, т.к. совпадает с k_1 , критерий k_8 отличается от критерия k_3 на постоянную величину - 1, поэтому его так же можно исключить.

Разделив на , получим новый критерий подобия:

$$k_{13} = \frac{G_{II}}{G_P} = idem \quad (29)$$

Тогда критерий k_2 оказывается лишним. Наличие критерия k_3 обуславливает следующее соотношение, справедливое для подобных перфораторов $k=idem$.

Следовательно, критерии k_1 и k_6 можно упростить, исключив из них безразмерный параметр «к». Заменяя в критериях k_5 , k_6 и k_7 переменную температуру сжатого воздуха в рабочей камере «Т» на температуру воздуха в подводящем шланге T_n , получим критерии, совпадающие с k_1 . Следовательно, критерии k_5 , k_6 и k_7 можно исключить. Заменяя в критериях k_9 , k_{10} , k_{11} и k_{12} и величину t на время цикла t_n , S на величину хода поршня, соответствующую периоду наполнения, S_k , P на P_n , полагая для определённости $y=y_{max}$ и учитывая, что t_n обратно пропорционально числу ударов “ n ”, получим окончательно следующую совокупность критериев подобия:

$$\frac{RT_n G_{II}}{nFS_k P_{II}} = idem \quad (30)$$

$$\frac{P'}{M_1' n^2 y_{max}} = idem \quad (31)$$

$$\frac{Q}{mn^2 h} = idem \quad (32)$$

$$\frac{F(P_{II} - P_a)}{P_{II}} = idem \quad (33)$$

$$N = \frac{Mf}{F} \sqrt{\frac{2kgm_{II}RT_{II}}{P_{II}(k-1)(V_m - V_e)}} \quad (34)$$

$$\frac{M_1 f_1}{M_2 f_2} = idem \quad (35)$$

$$k = idem \quad (36)$$

$$M = idem \quad (37)$$

где M – критерий Маха.

Эти критерии должны быть дополнены критериями, характеризующими начальные условия цикла.

Выведенная совокупность критериев подобия может быть положена в основу экспериментального исследования и создания уточнённой методики расчета пневматических перфораторов.

Динамика воздухораспределительных устройств пневмомолотков

Цель настоящей работы – разработка системы уравнений, характеризующей рабочий процесс воздухораспределительных устройств, совместно с рабочим процессом молотков [7,8].

1. Сложный пластинчатый клапан

Используя принцип Даламбера, запишем уравнения динамики клапана для прямого и обратного хода:

$$-(f_1 + f_2 + \Delta f - f_3)(P_{II} - P_a) + f_4(P_X - P_a) + m \frac{d^2 h}{dt^2} = 0 \quad (38)$$

$$(f_3 + f_4 - f_1)(P_{II} - P_a) - (f_2 + \Delta f)(P_X - P_a) - m \frac{d^2 h}{dt^2} = 0 \quad (39)$$

где m , h – соответственно масса и ход клапана;

P_{II} , P_a , P_X - соответственно давление сжатого воздуха, атмосферное давление и противодавление;

f_1 , f_2 , f_3 , f_4 и Δf - отдельные площади клапана, показанные на рис. 1 а и б.

Силой трения клапана пренебрегаем. Начальные условия одинаковы для прямого и обратного хода:

$$h(0) = 0; \quad \frac{dh}{dt}(0) = 0. \quad (40)$$

Зависимости h , dh/dt , d^2h/dt^2 могут быть получены из решения следующей задачи Коши: найти частный интеграл системы дифференциальных уравнений (38) и (39), соответствующий начальным условиям (40). Для учета термодинамики используем следующее дифференциальное

уравнение, которое достаточно полно описывает в общем виде рабочий процесс пневмомолотков в задней камере (расширение):

$$d\pi_x + k\pi_x \frac{dV}{V} - k\mu \sqrt{\frac{2}{k-1}} \sqrt{kgRT_{II}} \pi_x^{\frac{1}{k}} \cdot \sqrt{1 - \pi_x^{\frac{k-1}{k}}} \cdot \frac{f dt}{V} = 0, \quad (41)$$

где $\pi_x = \frac{P_x}{P_{II}}$.

По полученной индикаторной диаграмме модели строим скоростную напорную функцию

$$\pi_x^{\frac{1}{k}} \sqrt{1 - \pi_x^{\frac{k-1}{k}}} = f(\pi_x)$$

Чтобы упростить решение системы, вышеупомянутую функцию можно аппроксимировать следующим образом:

$$\pi_x^{\frac{1}{k}} \sqrt{1 - \pi_x^{\frac{k-1}{k}}} = f(\delta_x), \quad (42)$$

где δ - коэффициент, играющий роль константы подобия, определяется методом наименьших квадратов. Уравнение (41) примет вид:

$$\frac{d\pi_x}{dt} + \pi_x k \frac{dV}{V} \frac{1}{dt} - k\mu \delta \sqrt{\frac{2}{k-1}} \sqrt{kgRT_{II}} \frac{f}{V} = 0. \quad (43)$$

Если ход клапана будет h , то проходное сечение воздушного канала $f = \pi d_{кл} h$, а приведенное сечение

$$\frac{f}{V} = \frac{\pi d_{кл} h}{FS}, \quad (44)$$

где F - площадь поршня, S - ход поршня, $d_{кл}$ - диаметр клапана.

Из уравнения (38):

$$P_x = -\frac{m}{f_4} \frac{d^2 h}{dt^2} + P_a + \frac{f_1 + f_2 + \Delta f - f_3}{f_4} (P_{II} - P_a), \quad (45)$$

$$\pi_x = -\frac{m}{f_4 P_{II}} \frac{d^2 h}{dt^2} + \frac{P_a}{P_{II}} + \frac{f_1 + f_2 + \Delta f - f_3}{f_4} \left(1 - \frac{P_a}{P_{II}}\right) \quad (46)$$

$$\dot{\pi}_x = -\frac{m}{f_4 P_{II}} \frac{d^3 h}{dt^3} \quad (47)$$

Система уравнений (45) - (47) устанавливает связь между переменным давлением в рабочей камере и движением клапана. Подставляя правые части (46), (47) и (44) в (43), получим:

$$\begin{aligned} & -\frac{m}{f_4 P_{II}} \frac{d^3 h}{dt^3} \left[\frac{m}{f_4 P_{II}} \frac{d^2 h}{dt^2} - \frac{P_a}{P_{II}} - \frac{f_1 + f_2 + \Delta f - f_3}{f_4} \left(1 - \frac{P_a}{P_{II}}\right) \right] \times \\ & \times k \frac{dV}{V} \frac{1}{dt} - k\mu \delta \sqrt{\frac{2}{k-1}} \sqrt{kgRT_{II}} \frac{\pi d_{кл} h}{V} = 0 \end{aligned} \quad (48)$$

Разделив на $m/f_4 P_{II}$, введя обозначение $(f_1 + f_2 + \Delta f - f_3)/f_4 = f'$ и меняя знаки, получим:

$$\begin{aligned} & \ddot{h} + \dot{h} k \frac{dV}{dt} \frac{1}{V} + hk\mu\delta \sqrt{\frac{2}{k-1}} \sqrt{kgRT_{II}} \frac{\pi d_{кл} h}{V} - \\ & - k \left[\frac{P_a f_4}{m} + \frac{f f_4}{m} (P_{II} - P_a) \right] \frac{dV}{V} \frac{1}{dt} = 0 \end{aligned} \quad (49)$$

Решив полученное линейное дифференциальное уравнение III порядка, найдем искомые зависимости $h=f(t)$, $h=f(V)$, $h=f(S)$ для прямого хода поршня.

Запишем аналогичное дифференциальное уравнение термодинамического процесса в задней камере для обратного хода (рис. 1б), из уравнения (39) получим:

$$P_x = -\frac{m}{f_2 + \Delta f} \frac{d^2 h}{dt^2} + P_a + \frac{f_3 + f_4 - f_1}{f_2 + \Delta f} (P_{II} - P_a), \quad (50)$$

$$\pi_x = -\frac{m}{f_2 + \Delta f} \frac{d^2 h}{dt^2} \frac{1}{P_{II}} + \frac{P_a}{P_{II}} + \frac{f_3 + f_4 - f_1}{f_2 + \Delta f} \left(1 - \frac{P_a}{P_{II}}\right), \quad (51)$$

$$\dot{\pi}_x = -\frac{m}{(f_2 + \Delta f) P_{II}} \frac{d^3 h}{dt^3} \quad (52)$$

Подставив правые части (50) - (52) в (43), найдем:

$$\begin{aligned} & -\frac{m}{(f_2 + \Delta f) P_{II}} \frac{d^3 h}{dt^3} \left[\frac{m}{(f_2 + \Delta f) P_{II}} \frac{d^2 h}{dt^2} - \frac{P_a}{P_{II}} - \frac{f_3 + f_4 - f_1}{f_2 + \Delta f} \left(1 - \frac{P_a}{P_{II}}\right) \right] \times \\ & \times k \frac{dV}{dt} \frac{1}{V} + hk\mu\delta \sqrt{\frac{2}{k-1}} \sqrt{kgRT_{II}} \frac{\pi d_{кл} h}{V} = 0 \end{aligned} \quad (53)$$

$$\frac{f_3 + f_4 - f_1}{f_2 + \Delta f} = f'', \quad f_3 + \Delta f = f''',$$

$$\begin{aligned} & \ddot{h} + \dot{h} k \frac{dV}{dt} \frac{1}{V} + hk\mu\delta \sqrt{\frac{2}{k-1}} \sqrt{kgRT_{II}} \frac{\pi d_{кл} h}{V} - \\ & - k \left[\frac{P_a f''}{m} + \frac{f'''}{m} (P_{II} - P_a) \right] \frac{dV}{dt} \frac{1}{V} = 0 \end{aligned} \quad (54)$$

Вышеописанным методом записаны уравнения динамики для простого пластинчатого клапана (рис. 1 в, г) и для золотникового распределения (рис. 1 д, ж, з), эти уравнения приведены в таблице.

2. Бесклапанное воздушное распределение

Ввиду того, что поршень выполнен как одно целое с золотником (рис.1.), на уравнение (43) наложится условие

$$f = \alpha V, \quad (55)$$

где α - коэффициент пропорциональности.

Подставляя (55) в (43), получим:

$$\frac{d\pi_x}{dt} + \frac{\pi_x k}{dt} \frac{dV}{V} - k\mu\delta \sqrt{\frac{2}{k-1}} \sqrt{kgRT_{II}} \frac{\alpha V}{V} = 0, \quad (56)$$

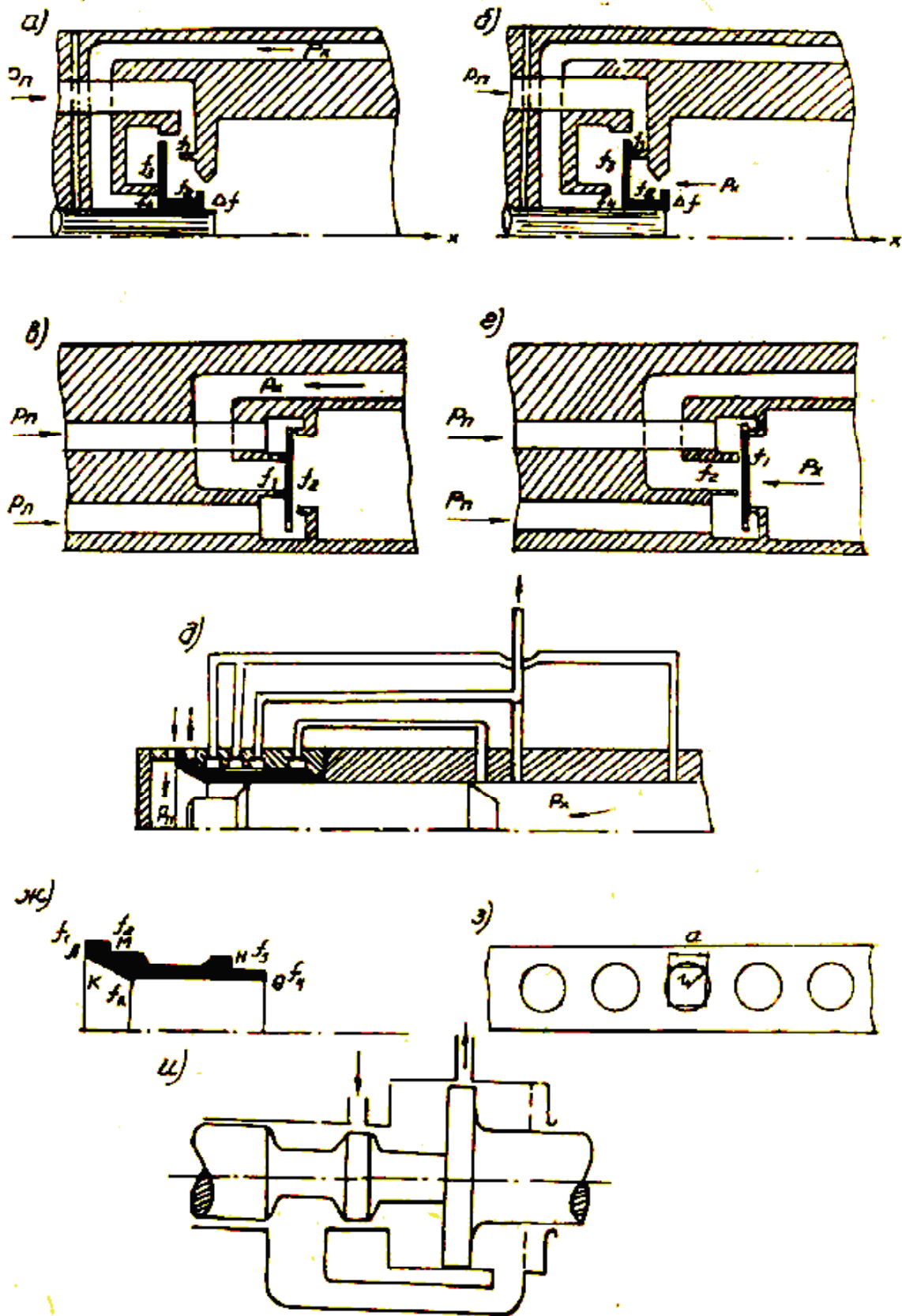


Рис. 1. Поршень.

Таблица 1. Типы воздухораспределения.

| Уравнения | | Типы воздухораспределения | |
|----------------------------------------------|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | | Простой пластинчатый клапан | Золотниковое воздухораспределение |
| Исходное уравнение | | $-(\rho_n - \rho_a)f_2 + f_1(p_x - p_a) + m \frac{d^2h}{dt^2} = 0$ | $(\rho_n - \rho_a)(f_k + f_l - f_2)(p_x - p_a)(f_3 + f_4) - m \frac{d^2h}{dt^2} = 0$ |
| Конечное дифференциальное уравнение динамики | Прямой ход | $\ddot{h} + \dot{h}k \frac{dV}{dt} \frac{1}{V} + hk\mu\delta \sqrt{\frac{2}{k-1}} \sqrt{kgRT_n} \frac{\pi d_{кт} h}{V} - k \left[\frac{f_1 P_a}{m} + \frac{f_2 (P_n + P_a)}{m} \right] \frac{dV}{dt} \frac{1}{V} = 0$ | $\ddot{h} + \dot{h}k \frac{dV}{dt} \frac{1}{V} + hk\mu\delta \sqrt{\frac{2}{k-1}} \sqrt{kgRT_n} \times \frac{na}{V} - \left[\frac{(f_3 + f_4) P_a}{m} + \frac{f_5 (P_n - P_a)}{m} \right] k \frac{dV}{dt} \frac{1}{V} = 0$ |
| Начальные условия | | $h(0) = 0; \frac{dh}{dt}(0) = 0$ | $h(0) = 0; \frac{dh}{dt}(0) = 0$ |
| Исходное уравнение | Обратный ход | $(\rho_n - \rho_a)f_1 - (p_x - p_a)f_2 - m \frac{d^2h}{dt^2} = 0$ | $-(\rho_n - \rho_a)(f_2 + f_3 + f_4) + (p_x - p_a)(f_k + f_l) + m \frac{d^2h}{dt^2} = 0$ |
| Конечное дифференциальное уравнение динамики | | $\ddot{h} + \dot{h}k \frac{dV}{dt} \frac{1}{V} + hk\mu\delta \sqrt{\frac{2}{k-1}} \sqrt{kgRT_n} \frac{\pi d_{кт} h}{V} - k \left[\frac{f_1 P_a}{m} + \frac{f_2 (P_n + P_a)}{m} \right] \frac{dV}{dt} \frac{1}{V} = 0$ | $\ddot{h} + \dot{h}k \frac{dV}{dt} \frac{1}{V} + hk\mu\delta \sqrt{\frac{2}{k-1}} \sqrt{kgRT_n} \times \frac{na}{V} - \left[\frac{(f_k + f_l) P_a}{m} + \frac{f_5 (P_n - P_a)}{m} \right] k \frac{dV}{dt} \frac{1}{V} = 0$ |
| Начальные условия | | $h(0) = 0; \frac{dh}{dt}(0) = 0$ | $h(0) = 0; \frac{dh}{dt}(0) = 0$ |
| Примечание | | | $f_5 = f_k + f_3 - f_2; f_5 = f_2 + f_3 + f_4$ |

$$d\pi_x + k\pi_x \frac{dV}{V} = Bdt, \quad (57)$$

где

$$B = k\mu\delta \sqrt{\frac{2}{k-1}} \sqrt{kgRT_n} \alpha$$

Начальные условия:

прямой ход: $P_x = P_n$; $V(0) = V_{01}$ - воздушная подушка; $V_n(0) = 0$ - скорость поршня;

обратный ход:

$$P_x \approx P_n;$$

$V(0) = V_{02}$ - воздушная подушка;

$$V_n(0) = \varepsilon V_k = \varepsilon \sqrt{\frac{2A}{m_1}},$$

где

$$A = -\frac{m_1 V_k^2}{2},$$

m_1 - масса поршня; V_k - скорость поршня в конце хода; ε - коэффициент отскока.

Запишем уравнение (57) в более удобной для решения форме:

$$\dot{\pi}_x + \pi_x p(t) = B, \quad (58)$$

где

$$p(t) = k \frac{dV}{Vdt}.$$

Это линейное дифференциальное уравнение 1-го порядка с переменными коэффициентами, общий интеграл которого:

$$\pi_x = e^{-\int p(t)dt} \left[\int B e^{\int p(t)dt} dt + c \right]. \quad (59)$$

Заменяем для упрощения реальный процесс пневмомолотка с переменным ускорением процессом с постоянным ускорением a , энергетически эквивалентный реальному, тогда:

$$V = FS = F \frac{at^2}{2}, \quad (60)$$

где S - ход поршня;

$$\frac{dV}{dt} = Fat; P(t) = \frac{2k}{t}.$$

Очевидно, что

$$\int_{t_0}^t P(t) dt = \int_{t_0}^t \frac{2k dt}{t} = 2k \ln \frac{t}{t_0} \quad (61)$$

Подставив (61) в (59), после несложных преобразований, получим:

$$\pi_x = e^{-k \ln \frac{t}{t_0}} \left[\frac{B}{t_0^{2k}} \left(\frac{t^{2k+1} - t_0^{2k+1}}{2k+1} \right) + c \right]. \quad (62)$$

Следовательно, специфический закон площади впуска бесклапанного воздухораспределения позволяет проинтегрировать уравнение энергетического баланса в конечном виде.

В зависимости от типа распределения, хода и участка цикла уравнение (41) может иметь различные частные решения. Предложенные основы динамики воздухораспределителей позволяют разработать инженерный метод расчета.

Выводы

1. Предложена система дифференциальных уравнений термодинамики тела переменной массы и уравнение динамики поршня для описания рабочего процесса пневматического перфоратора.
2. Разработан метод сравнения перфораторов по принципу подобия, позволяющий результаты единичных исследований распространить на весь типоразмерный ряд.

3. Составлены дифференциальные уравнения, характеризующие рабочий процесс наиболее распространенных типов воздухораспределительных устройств пневматических молотков и предложены методы их решения.

Литература

1. Герц Е.В. Динамика пневматических систем машин. - М.: Машиностроение, 1985.-256с.
2. Jacazio G., Piombo B., Romiti A. The optimization of the performance of vanetype air motors.-Proceedings of the 5th World Congress on Theory of Machines and Mechanisms, 1973, July 8-3, Montreal, V.L. 607-610.
3. Прилепский Р.К. и др. Исследование рабочего процесса свободнопоршневого дизель компрессора// Вісник Донбаської національної академії будівництва та архітектури.- Випуск 6(62). – 2006. – С. 89-97.
4. Barth H.J. Drehmoment – Verluste durch Ein – und Auslassdrosselung an Druckluft-Lamellen Motoren. – Olhhydraulik und Pneumatik, 1979, 23, №9, S679-683.
5. Попов Ю.Н., Прилепский Р.К., Скуба В.Н. Основы теории подобия пневматических бурильных машин. – Новосибирск: Наука, 1979.-111с.
6. Perforation Controlada por computador. //Int. Mining, 1986,3 №6.-P.20-23.
7. Филиппов В.В. Процессы впуска и выпуска в поршневых компрессорах. – М.: Машгид, 1960. – 141с.
8. Алимов О.Д., Дворников Л.Т. Бурильные машины. - М.: Машиностроение, 1976. – 295с.

Прилепський Ростислав Кирилович – к.т.н., доцент кафедри «Автомобілі і автомобільне господарство» Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: основи проектування технологічного устаткування.

Савенко Едуард Станіславович – к.т.н., доцент кафедри «Автомобілі і автомобільне господарство» Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: технологічні основи машинобудування, основи технології виробництва і ремонт автомобілів, методи відновлення деталей машин.

Крахін Станіслав Валерійович – асистент кафедри «Автомобілі і автомобільне господарство» Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: теоретичні основи надійності машин.

Рибалко Роман Іванович – к.т.н., доцент кафедри «Підійомно-транспортні, будівельні, дорожні машини та обладнання» Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: механічне обладнання заводів (ЗБВ).

Прилепский Ростислав Кириллович – к.т.н., доцент кафедры «Автомобили и автомобильное хозяйство» Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: основы проектирования технологического оборудования.

Савенко Эдуард Станиславович – к.т.н., доцент кафедры «Автомобили и автомобильное хозяйство» Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: технологические основы машиностроения, основы технологии производства и ремонт автомобилей, методы восстановления деталей машин.

Крахин Станислав Валерьевич – ассистент кафедры «Автомобили и автомобильное хозяйство» Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: теоретические основы надежности машин.

Рыбалко Роман Иванович – к.т.н., доцент кафедры «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование» Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: механическое оборудование заводов (ЖБИ).

Prilepskiy Rastislav Kirillovich – the candidate of technical science, the assistant professor of the «Automobiles and Motor-car Economy» chair of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: bases of planning of technological equipment.

Savenko Edward Stanislavovich – candidate of technical science, an assistant professor of the «Automobiles and Motor-car Economy» chair of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: technological bases the mechanical of engineering, bases of production technology and cars repairing, methods of reestablishment of machines details.

Krakhin Stanislav Valer'evich – an assistant of the «Automobiles and Motor-car Economy» chair of Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: theoretical bases of machines reliability.

Rybalko Roman Ivanovich – C.T.Sc, the assistant professor of the «Lifting-transporting road-building machines and equipment» chair of Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: mechanical equipment of reinforced-concrete wares plants (FCW).