

**РАСЧЕТНАЯ СХЕМА И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ  
ПНЕВМАТИЧЕСКОГО МОЛОТКА  
ДЛЯ ЭЛЕКТРОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

В. И. БАБУРОВ, В. Ф. ГОРБУНОВ, В. М. РАЗИН, И. Г. СМЫШЛЯЕВА,  
А. В. ТРИХАНОВ

(Представлена семинаром факультета автоматики и вычислительной техники)

Чтобы стать действительным объектом исследования, процесс должен иметь достаточно точное математическое описание [1]. Такое описание должно являться абстрактно-формальной характеристикой процесса, то есть его математической моделью. Разработке математической модели, как правило, предшествует составление расчетной схемы исследуемого объекта.

При всяком теоретическом исследовании реальной физической системы мы всегда вынуждены в большей или меньшей степени идеализировать свойства описываемого объекта. Некоторая идеализация задачи является неизбежной, ибо если бы нам и удалось учесть значительную часть или даже все факторы, влияющие на поведение системы, то задача получилась бы столь сложной, что ее решение было бы чрезвычайно затруднительно или вообще невозможно. В связи с этим возникает вопрос, до какой степени можно идеализировать свойства объекта и все же получить удовлетворительные результаты. Ответ на это в конечном счете дает только опыт, эксперимент. Сравнивая данные идеализированного рассмотрения того или иного вопроса с результатами опыта, мы можем судить, насколько законна та или иная идеализация.

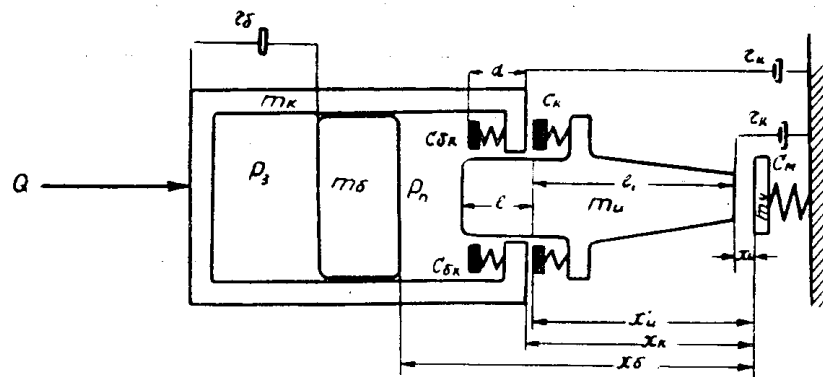


Рис. 1. Расчетная схема пневматического молотка.

В работе [2] сформулированы основные требования к электронной модели пневматического молотка. Этим требованиям более полно удовлетворяет расчетная схема пневматического молотка, представленная на рис. 1.

Данная расчетная схема предложена на основании анализа экспериментальных исследований пневматических молотков, ведущихся коллективом кафедры горных машин ГПИ, и ряда опубликованных работ [3, 4, 5, 6, 7]. Аналогичную расчетную схему имеют и электромагнитные молотки со свободным выбегом бойка [8, 9].

На схеме (рис. 1) и в дальнейшем изложении приняты следующие обозначения:

- $m_k, m_b, m_n$  — масса соответственно корпуса молотка, ударника и инструмента;  
 $p_3$  — давление воздуха в задней полости молотка;  
 $p_n$  — давление воздуха в передней полости молотка;  
 $S_b$  — площадь поперечного сечения бойка;  
 $Q$  — постоянная сила, действующая на корпус (усилие нажатия рабочего);  
 $d$  — толщина передней стенки корпуса;  
 $l$  — длина хвостовика инструмента;  
 $l_1$  — длина инструмента без хвостовика;  
 $C_{б.к}$  — пружина, имитирующая упругость материала бойка и корпуса при их соударении;  
 $C_k$  — пружина, имитирующая упругость материала корпуса инструмента при их контакте;  
 $C_m$  — пружина, имитирующая упругость обрабатываемого материала;  
 $x_k, x_b, x_n$  — перемещение корпуса, бойка и инструмента относительно несжатой пружины  $C_m$ ;  
 $m_y$  — масса абсолютно неупругого ограничителя ( $m_y=0$ );  
 $r_b, r_k, r_n$  — вязкое трение бойка, корпуса и инструмента;  
 $\eta$  — отношение площади поперечного сечения хвостовика инструмента к площади сечения бойка.

В дальнейшем полагаем, что  $d=0$ ,

При этом вместо  $l$  нужно рассматривать  $l_2-d$ , которое можно обозначить через  $l$ .

Введенное допущение справедливо в случае, если колебания в инструменте и стенке отсутствуют.

Под действием давления воздуха все составные части молотка совершают колебательные движения, при этом между ними происходят упругие удары.

Дифференциальные уравнения, описывающие динамику работы, рассматриваемой трехмассовой нелинейной колебательной системы, можно представить в виде:

$$m_n \frac{d^2 x_n}{dt^2} = -\eta S_b p_n - r_n \frac{dx_n}{dt} + \xi_k C_k (x_k - x_n) - \xi_m C_m x_n; \quad (1)$$

$$m_b \frac{d^2 x_b}{dt^2} = -S_b p_3 + S_b p_n - r_b \frac{dx_b}{dt} - \xi_{б.к} C_{б.к} (x_b - x_k); \quad (2)$$

$$m_k \frac{d^2 x_k}{dt^2} = -Q - S_b p_n + S_b p_3 - r_k \frac{dx_k}{dt} - \xi_k C_k (x_k - x_n) + \xi_{б.к} C_{б.к} (x_b - x_k), \quad (3)$$

где

$$\xi_m = \begin{cases} 0, & x_n \geq 0; \\ 1, & x_n < 0; \end{cases} \quad \xi_k = \begin{cases} 0, & x_k \geq x_n; \\ 1, & x_k < x_n; \end{cases} \quad (4)$$

$$\xi_{б.к} = \begin{cases} 0, & x_б \gg x_к; \\ 1, & x_б < x_к. \end{cases}$$

Задание послеударных скоростей бойка, инструмента и корпуса в моменты ударов бойка об инструмент, инструмента о боек и инструмента о корпус соответственно осуществляются с помощью выражений:

$$\dot{x}_б = \kappa_{б.б} \dot{x}_{б.у} + \kappa_{б.и} \dot{x}_{и.у}; \quad (5)$$

$$\dot{x}_и = \kappa_{и} (\kappa_{и.и} \dot{x}_{и.у} + \kappa_{и.б} \dot{x}_{б.у}); \quad (6)$$

$$\dot{x}_к = \kappa_{к.к} \dot{x}_{к.у} + \kappa_{к.и} \dot{x}_{и.у}. \quad (7)$$

где указанные коэффициенты учитывают следующее:

$\kappa_{б.б}$  — влияние скорости бойка перед ударом на его послеударную скорость;

$\kappa_{б.и}$  — влияние скорости инструмента перед ударом на послеударную скорость бойка;

$\kappa_{и.и}$  — влияние скорости инструмента перед ударом на его ударную скорость;

$\kappa_{и.б}$  — влияние скорости бойка перед ударом на послеударную скорость инструмента;

$\kappa_{к.к}$  — влияние скорости корпуса перед ударом на послеударную его скорость;

$\kappa_{к.и}$  — влияние скорости инструмента перед ударом на послеударную скорость корпуса;

$\kappa_{и}$  — коэффициент восстановления скорости инструмента.

Значительное затруднение при моделировании встречает выбор объективно обоснованных коэффициентов скорости при соударении бойка с инструментом, инструмента с обрабатываемым материалом и т. д. Принятые нами коэффициенты (табл. 1) основаны на исследованиях реальных молотков в лабораторных условиях и литературных данных [3, 4, 6, 10].

Таблица 1

| Условное обозначение | Наименование коэффициента  | Обрабатываемый материал |        |           |          |        | Источники данных                   |
|----------------------|--|-------------------------|--------|-----------|----------|--------|------------------------------------|
|                      |  | сталь                   | гранит | известняк | алюминий | дерево |                                    |
| $\kappa_{б.б}$       | Коэффициент отскока бойка при ударе по хвостовику инструмента                          | 0,35                    | 0,30   | 0,2       | 0,1      | 0,05   | [6, 10] и собственные исследования |
| $\kappa_{и}$         | Коэффициент восстановления скорости инструмента при ударе по обрабатываемому материалу | 0,3                     | 0,25   | 0,17      | 0,1      | 0,05   | [4, 6]                             |
| $\kappa_{и.и}$       |  | 0                       | 0      | 0         | 0        | 0      |                                    |
| $\kappa_{б.и}$       |  | 0                       | 0      | 0         | 0        | 0      |                                    |
| $\kappa_{и.б}$       |  | 0,39                    | 0,42   | 0,48      | 0,54     | 0,57   |                                    |
| $\kappa_{к.к}$       |  | 0                       | 0      | 0         | 0        | 0      |                                    |
| $\kappa_{к.и}$       |  | 0,19                    | 0,19   | 0,19      | 0,19     | 0,19   |                                    |

Определенные трудности представляет вопрос введения возмущающих сил в математическое описание.

Все составные части системы, представляющие собой пневмомолоток, совершают движения под действием возмущающих сил — давлений воздуха в обеих полостях цилиндра молотка, меняющихся во времени благодаря золотниковому устройству в соответствии с перемещением бойка относительно корпуса.

Формы диаграмм давления воздуха в обеих полостях молотка могут быть разными.

При работе молотка в зависимости от давления воздуха в сети, крепости обрабатываемой породы и усилия нажатия диаграммы давлений воздуха в обеих полостях молотка меняются в основном в количественном отношении. Особенно существенны изменения для передней полости, объем которой может меняться за счет выхода хвостовика инструмента из полости корпуса.

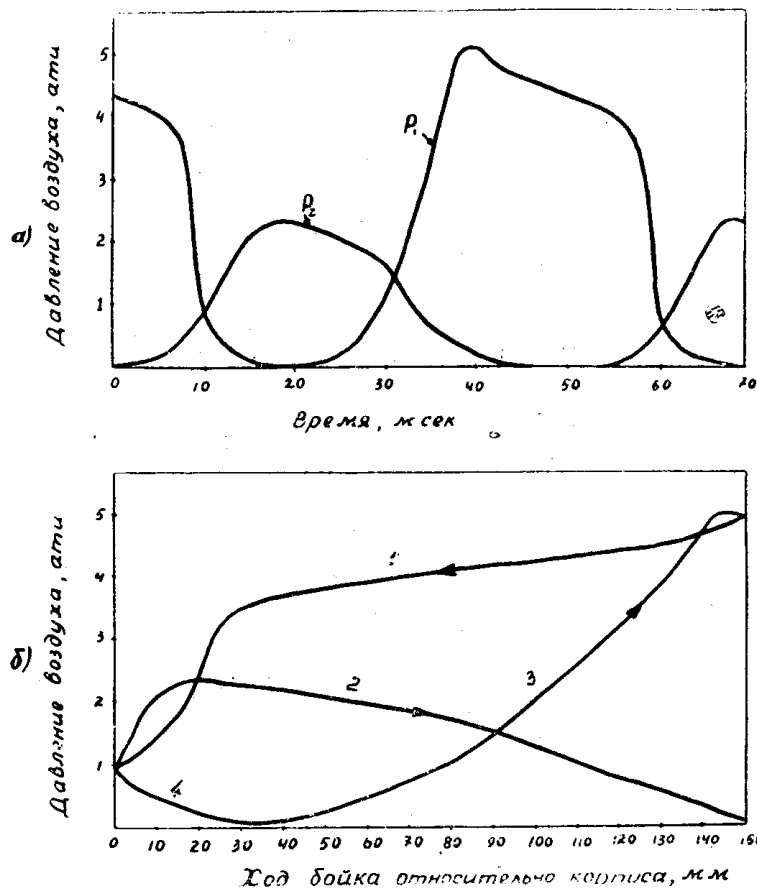


Рис. 2. Диаграммы изменения давления воздуха в пневматическом молотке КЕ-22:  $p_1$  — давление воздуха в задней полости молотка;  $p_2$  — давление воздуха в передней полости молотка; 1—4 — изменение давлений при прямом (рабочем) ходе ударника; 2—3 — изменение давлений при обратном ходе бойка.

Так например, для молотка КЕ-22 при увеличении давления в обеих полостях молотка увеличивается частота ударов.

При возрастании крепости обрабатываемой породы увеличивается частота работы молотка.

Уменьшение усилия нажатия приводит к увеличению давления в передней полости, что вызывает увеличение частоты работы.

Видимо, подобное должно иметь место и для других возмущающих сил. Эти обстоятельства нужно иметь в виду, рассматривая вопрос о реализации возмущающих сил.

По нашему мнению, наиболее целесообразно исходить из задания форм диаграмм, как функций от перемещения бойка относительно корпуса. Вот, например, (см. рис. 2, а) как выглядят зависимости этих давлений воздуха в обеих полостях молотка от перемещения бойка относительно корпуса для обычных диаграмм (рис. 2, б).

Такой подход к заданию диаграмм давления воздуха дает возможность;

а) проводить исследования при различных формах возмущающих сил,

б) учитывать влияние динамики молотка на диаграммы возмущающих сил.

При реализации диаграмм давлений в обеих полостях, очевидно, как правило, потребуется четыре блока нелинейности. Два блока используются при воспроизведении диаграмм при обратном ходе, два — при прямом.

Диаграмма давления воздуха в одной полости, следовательно, набирается с помощью двух блоков, выход которых используется поочередно в зависимости от хода бойка.

При воспроизведении диаграмм, имеющих крутые фронты не в точках смены ходов, по нашему мнению, наиболее целесообразно использовать релейную коммутацию выходов нелинейных блоков в этих точках.

Коэффициенты вязкого трения  $r_b$ ,  $r_k$ ,  $r_n$  могут быть выбраны равными 0,65, 50, 18 соответственно.

Коэффициенты жесткости пружин, моделирующих упругость материалов элементов схемы и обрабатываемого материала могут быть выбраны следующими:

$$C_k = C_{b,k} = 3 \cdot 10^5 \text{ кг/м},$$

$C_m$  — жесткость пружины, имитирующей обрабатываемый материал,  $= 15 \cdot 10^5 \text{ кг/м}$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. М. Ашавский. К научным основам расчета оптимальных параметров проектируемых буровых установок. Сб. трудов ЦКБ МГ и ОН СССР, № 4, 1961.
2. В. И. Бабуров, В. Ф. Горбунов, В. М. Разин, И. Г. Смышляева, А. В. Триханов. Исходные предпосылки для электронного моделирования изоляции и гашения вибрации пневматических молотков. (Печатается в данном сборнике).
3. О. Д. Алимов, И. Г. Басов, В. Ф. Горбунов, Д. Н. Маликов. Бурильные машины. Госгортехиздат, 1960.
4. В. К. Бучнев. Буровзрывные работы. Углетехиздат, 1955.
5. Е. В. Герц, Г. В. Крейнин. Теория и расчет силовых пневматических устройств. Издание АН СССР, 1960.
6. Н. Н. Есин. О начальных условиях рабочего цикла бурильных молотков. Сб. «Машины ударного действия», Новосибирск, 1953.
7. Б. В. Суднишников. Влияние параметров прямого хода на мощность и отдачу пневматического молотка. Ударно-вращательное бурение. Машины ударного действия, Новосибирск, 1956.
8. Л. М. Минкевич. Использование моделирующих устройств для исследования соленоидных молотков. Математические методы в горном деле, ч. I, «Горные машины и автоматика», Новосибирск, 1963.
9. Н. П. Ряшенцев, Е. М. Тимошенко. Соленоидные молотки. Известия ТПИ, т. 108, Металлургиздат, 1959.
10. М. Н. Никишин. Отскок бойка и влияние его на работу отбойных молотков и бетоноломов. Труды ВНИИСтройдормаш, вып. XXX, Москва, 1961.