ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА имени С. М. КИРОВА

Том 146 1966

К ВОПРОСУ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ МОЛОТКОВ

В. Ф. ГОРБУНОВ

(Представлена кафедрой горных машин, рудничного транспорта и горной механики)

Экспериментальные и теоретические исследования пневматических машин ударного действия, проведенные в Томском политехническом институте под руководством и при участии проф. П. М. Алабужева и О. Д. Алимова, позволили по-новому сформулировать требования к рабочему процессу и конструкции пневматических молотков. Исследования механизма разрушения горных пород при ударно-поворотном бурении и к. п. д. передачи энергии, а также влияние режимов работы молотков на характер протекания внутренних процессов показали, что изолированное описание термодинамических процессов в молотке без учета движения его корпуса, инструмента и действующих усилий нажатий рабочего не дает правильного решения рабочего цикла.

Основываясь на результатах исследования взаимосвязи усилия подачи с основными параметрами пневматического молотка [1], собственных исследованиях рабочего процесса и вибрации пневматических молотков и результатах решения основных уравнений рабочего цикла на электронных моделях [2, 3], нам представляется описание динамики пневматического молотка следующим.

Уравнения, описывающие внутренний процесс пневматического молотка, могут быть составлены при введении некоторых предположений и допущений, в определенной степени упрощающих математическое формулирование отдельных членов уравнений. К таким предположениям относятся следующие:

1) термодинамические процессы, протекающие в цилиндре молотка, принимаются равновесными (квазистатическими);
2) сжатый воздух следует закономерностям идеального газа;
3) внешний теплообмен отсутствует;
4) давление воздуха на входе в машину постоянно;
5) утечками воздуха через неплотности поршня пренебрегаем;
6) периоды, в течение которых происходит изменение сечения впускных окон, из рассмотрения исключаются;
7) сжатый воздух не может поступать одновременно в обе полости цилиндра.

Такие допущения возможно принять без искажения физического смысла исследуемых явлений, хотя точность решения, естественно, уменьшится. Однако без этих упрощений решение уравнений было бы вообще невозможно.

Не проводя весь вывод уравнений состояния воздуха в полостях, изложенный подробно в работах [2, 3, 4] и других, запишем их в функции времени:

$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{\kappa}{F_1 x}\left[nRT_c \mu_1 f_1 \sqrt{\frac{2g\cdot\kappa}{\kappa-1}}\cdot\sqrt{\frac{p_c}{W_1}}\,\Phi\left(\frac{p_1}{p_c}\right) - F_1 p_1 \frac{dx}{dt}\right], \tag{1}$$

$$\frac{dp_2}{dt} = \frac{\kappa}{\alpha F_1 (L_ц - x)}\left[-\mu_2 f_2 \sqrt{2g\frac{\kappa}{\kappa-1}}\cdot\sqrt{RT_2}\cdot p_0^{-\frac{\kappa-1}{2\kappa}}\cdot p_2^{\frac{3\kappa-1}{2\kappa}}\,\Phi\left(\frac{p_a}{p_2}\right) + \alpha F_1 p_2 \frac{dx}{dt}\right], \tag{2}$$

где

$$\alpha = \frac{F_2}{F_1};\ pV = RT;\ W_1 = F_1 x,$$

$\Phi\left(\frac{p_a}{p_2}\right) = \sqrt{\left(\frac{p_a}{p_2}\right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_a}{p_2}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}}}$ — для подкритического истечения $\left(\beta \geqslant \beta_{кр} = \frac{p_a}{p_2} = 0{,}53\right)$;

$\Phi\left(\frac{p_a}{p_2}\right) = \sqrt{\left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{2}{\kappa-1}} - \frac{\kappa+1}{\kappa-1}} = \mathrm{const}$ — для надкритического истечения $(\beta < \beta_{кр})$;

$\Phi\left(\frac{p_1}{p_c}\right) = \sqrt{\left(\frac{p_1}{p_c}\right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_1}{p_c}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}}}$ — для подкритического истечения;

$\Phi\left(\frac{p_1}{p_c}\right) = \sqrt{\left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{2}{\kappa-1}} - \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa+1}}} = \mathrm{const}$ — для надкритического истечения;

$\mu_1 f_1 \sqrt{2g\frac{\kappa}{\kappa-1}}\cdot\sqrt{\frac{p_a}{W_1}}\,\Phi\left(\frac{p_1}{p_c}\right) = G$ — весовой расход воздуха, втекающего в цилиндр;

$\mu_2 f_2 \sqrt{2g\frac{\kappa}{\kappa-1}}\cdot\sqrt{\frac{p_2}{W_2}}\cdot\Phi\left(\frac{p_a}{p_2}\right) = G_р$ — весовой расход воздуха, вытекающего из цилиндра.

$\kappa = 1{,}4$ — показатель процесса;
f_1 и f_2 — площади сечения каналов впуска и выхлопа;
μ_1; μ_2 — коэффициенты расхода впускного и выхлопного отверстий;
F_1 и F_2 — площади поршня со стороны полостей рабочего и холостого ходов;
$L_ц$ — приведенная длина цилиндра;
x — координата поршня;
g — ускорение свободного падения;

$\beta_{кр} = \frac{p_{a,1}}{p_{c,2}} = 0{,}53$ — показатель характеристики процесса истечения.

Уравнение движения поршня в цилиндре молотка может быть выведено из предположения, что на поршень действуют следующие силы:

p_1F_1 — сила от давления воздуха в задней полости;

p_2F_2 — сила противодавления со стороны передней полости;

$p_a(F_1 - F_2)$ — сила, возникающая от действия атмосферного давления;

$m\dfrac{d^2x}{dt^2}$ — сила инерции;

$r\dfrac{dx}{dt}$, $R_{тр} sig\, n \dfrac{dx}{dt}$ — сила вязкого или сухого трения;

$\xi C_и \Delta$ — сила, возникающая при ударе поршня по инструменту.

Тогда

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = p_1F_1 - p_2F_2 - p_a(F_1 - F_2) - r\frac{dx}{dt} + \xi C_и \Delta$$

или

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{F_1}{m}[p_1 - \alpha p_2 - p_a(1-\alpha)] - \frac{r}{m}\frac{dx}{dt} + \xi\frac{C_и\Delta}{m}. \qquad (3)$$

Уравнения (1), (2) и (3) составлены для условия, когда корпус молотка и инструмент неподвижны. Поэтому для выявления общей динамики работы молотка необходимо систему уравнений дополнить еще двумя дифференциальными уравнениями второго порядка [5]:

$$m_к\frac{d^2x_к}{dt^2} = \varphi_1(p_1) - \varphi_2(p_2) - \frac{r_к dx_к}{dt} + \xi_к C_к(x_к - x_и) -$$
$$- \xi_{б.к} C_{б.к}(x_б - x_к) - Q; \qquad (4)$$

$$m_и\frac{d^2x_и}{dt^2} = \varphi_3(p_2) - \frac{r_и dx_и}{dt} - \xi_м C_м x_и - \xi C_и\Delta - \xi_к C_к(x_к - x_и), \qquad (5)$$

где $m_к$ и $m_и$ — массы корпуса молотка и инструмента;

$x_к$, $x_и$ — координаты $m_к$ и $m_и$;

$\varphi_1(p_1)$; $\varphi_2(p_2)$; $\varphi_3(p_3)$ — силы давления воздуха на элементы молотка, заданные по уравнениям (1), (2);

ξCx — упругие силы, возникающие при соударении элементов молотка;

Q — усилия нажатия на молоток.

Аналитическое решение системы дифференциальных уравнений (1—5) с достаточной для практики точностью произвести не представляется возможным. Единственным приемлемым методом решения, по нашему мнению, является использование математических машин, позволяющих разрешить не только нелинейные функции термодинамического процесса, но и реализовать нелинейности типа упругий удар. Большими возможностями в этом отношении обладают электронные моделирующие установки, использование которых дает возможность преодолеть ряд формальных математических трудностей при решении нелинейных задач.

Решение уравнений (1—3) можно было бы производить, разбив весь цикл на ряд участков, как это делали некоторые авторы [4, 6]. Однако во всех этих случаях данные расчетов значительно отличаются от экспериментальных. Решение же системы всех пяти уравнений еще более трудно ввиду того, что в литературе отсутствует установившееся мнение о значениях коэффициента восстановления скорости поршня при ударе его по инструменту. Экспериментальные и теоретические исследования ряда авторов дают весьма разноречивые результаты, мало пригодные для определения реального значения этого коэффициента. Все исследования коэффициента восстановления скорости при соударении двух свободных тел (в том числе и при наличии третьего ограничителя — породы или защемления инструмента), по нашему мнению, не полно отражают физику процесса соударения поршня пневматического молотка с инструментом ввиду наличия в реальных конструкциях давления воздуха на поршень в момент удара.

Таким образом, точное решение системы уравнений, описывающей рабочий процесс пневматической машины, зависит от точности задания исходных данных и разрешающей способности выбранного метода решения. Первое может быть выполнено путем накопления достаточного количества экспериментального материала, полученного с использованием наиболее совершенных измерительных средств. В качестве же универсального средства решения систем дифференциальных уравнений в настоящее время общепризнанными являются математические машины непрерывного или дискретного действия.

Подготовка к моделированию составленной системы дифференциальных уравнений, как известно [7], заключается в выборе пределов и масштабных соотношений величин, переводе исследуемых величин в напряжения, составлении структурной схемы модели и наборе отдельных функций на блоках переменных коэффициентов и блоках нелинейностей.

Это по сути программирование задачи просто осуществить, если имеющаяся электронная модель обладает большой разрешающей способностью. Однако распространенные в неспециализированных предприятиях модели типа ИПТ-5, МН-7 и др. имеют весьма ограниченное число операционных блоков. В связи с этим задачу приходится решать по частям, в зависимости от поставленных требований. Так, например, при исследовании внутреннего процесса бурильного молотка ПР-24 л на модели ИПТ-5 мы вынуждены были ввести допущения, что корпус молотка и инструмент неподвижны, система уравнений (1—3). А после получения диаграмм внутреннего процесса отдельно решалась задача о колебаниях корпуса молотка при его работе (система уравнений (3—5)). Такой подход к решению сложных задач приемлем, однако страдает несколько точность решения [8].

При постановке задачи исследования вибрации и способов ее ограничения мы ограничились решением только тех уравнений, которые описывают перемещение элементов системы, то есть уравнений (3—5). В данном случае возмущающие силы (давление воздуха) вводились в модель в виде функций от перемещения поршня пневматического молотка и набирались на блоках нелинейностей [9].

Как показывает опыт моделирования, решение задач динамики пневматического молотка частями является приемлемым не только при наличии малых моделей, но и с точки зрения ускорения программирования задачи и увеличения точности решения. Наличие большого числа функциональных блоков ведет также к уменьшению надежности модели и, как следствие, к большим затратам времени на отыскание неполадок в процессе решения задачи.

Моделирующие установки позволяют получать результаты решения в виде выходного напряжения, выдаваемого на пульт управления. Здесь оно регистрируется стрелочным прибором и может быть подано на электронный индикатор. Для регистрации сигнала возможно применять фотографические устройства или визуальный отсчет. Однако при решении многих задач возникает необходимость производить последовательную обработку выходных сигналов. В частности, при исследовании вибрации пневматических молотков весьма желательно получать среднеарифметические и среднеквадратичные величины. В силу сравнительно малой мощности сигнала, выдаваемого пультом управления модели, практически невозможно проводить обработку сигнала на электромеханических и электромагнитных счетчиках. Поэтому возникает потребность разработки специальных электронных блоков для этих целей. Очевидно, такие блоки должны изготовляться и поставляться вместе с моделью.

Нами совместно с работниками кафедры математических и счетно-решающих приборов и устройств ТПИ разработан один из таких блоков [10], основанный на электронном печатающем вольтметре ЭЦПВ-1. Применение блока для автоматического вычисления амплитуды вибрации молотков позволяет значительно ускорить проведение исследований.

Выводы

1. Решение системы дифференциальных уравнений, описывающей динамику пневматических молотков на моделирующих установках малой мощности, возможно при использовании метода последовательного моделирования отдельных частей системы.

2. Целесообразным вариантом моделирования системы уравнений, описывающей термодинамические процессы в молотке и движение его частей, является разделение системы по уравнению движения поршня, которое должно входить как в первую, так и во вторую часть решаемой задачи.

3. Для автоматической обработки выходного сигнала модели целесообразно применять специальные электронные блоки, изготовление которых должно производиться совместно с самой моделью.

ЛИТЕРАТУРА

1. О. Д. Алимов. Взаимосвязь усилия подачи с основными параметрами бурильного молотка. Известия ТПИ, т. 108, Металлургиздат, 1959.
2. Г. А. Терехов, А. Д. Школьников. Электронное моделирование рабочего цикла пневматических отбойных молотков. Известия вузов, Горный журнал, № 4, 1963.
3. Е. В. Герц, Г. В. Крейнин. Теория и расчет пневматических устройств. Изд. АН СССР, 1960.
4. В. М. Мостков. Основы теории пневматического бурения. Углетехиздат, 1952.
5. В. Ф. Горбунов. Исследование рабочих процессов и вибрации пневматических молотков. Докторская диссертация, Томск, 1964.
6. А. П. Герман. Применение сжатого воздуха в горном деле. Горно-геол.-нефт. изд., М—Л., 1933.
7. И. М. Тетельбаум. Электрическое моделирование. Физматгиз, 1951.
8. А. В. Баранов, И. А. Орданович. Расширение возможностей моделирующих устройств. Доклад на IV межвузовской конференции по применению физического и математического моделирования, Сб. № 3, М., 1962.
9. В. Ф. Горбунов, А. В. Триханов, И. Г. Смышляева. Электронная модель для исследования вибрационных процессов в пневмомолотках. Изв. ТПИ, т. 141, 1965.
10. В. Ф. Горбунов, В. М. Разин, Н. И. Саблин, И. Г. Смышляева, А. В. Триханов. Устройство для автоматического вычисления амплитуды вибрации при исследовании вибрационных характеристик ручных машин ударного действия на электронных моделирующих установках. Тезисы доклада на XX Всесоюзной научной сессии, посвященной Дню радио, М., 1964.