

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОУБОЙНОГО МОЛОТКА С УПРУГОЙ (ВОЗДУШНОЙ) СВЯЗЬЮ

АЛАБУЖЕВ П. М.

Доцент, кандидат физико-математических наук

§ 1. Введение

В этой работе, выполненной по предложению конструкторского бюро Томского электромеханического завода (ТЭМЗ), дано исследование рабочего процесса электропневматического молотка при заданных параметрах, определяющих его работу. Указаны методы совместного решения уравнений движения бойка и мотора, когда упругой связью между бойком и поршнем является воздух. В качестве примера приведено численное решение, в котором рассмотрен весь рабочий процесс молотка за период его работы, а также выяснена роль и значение начальных данных.

Здесь автор считает своим долгом выразить благодарность проф. Нечаеву В. К. за просмотр работы и данные им советы, а также старшему инженеру ТЭМЗ Батуеву Н. М. за помощь в оформлении чертежей и предоставлении необходимых материалов и пособий.

Обозначения, принятые в работе:

- r —радиус кривошипа;
- L —длина шатуна;
- λ —отношение радиуса кривошипа к длине шатуна;
- d —диаметр поршня (и бойка)
- B —площадь поршня (и бойка);
- l_0 —начальное расстояние между поршнем и бойком;
- l —расстояние между поршнем и бойком;
- s —путь, пройденный поршнем от начального положения;
- x —путь, пройденный бойком от начального положения;
- $u = x - s$ —относительное расстояние между бойком и поршнем;
- $v_n = \dot{s}$ —скорость поршня;
- $v_b = \dot{x}$ —скорость бойка;
- $u = \dot{x} - \dot{s}$ —относительная скорость между бойком и поршнем;
- $W_n = \ddot{s}$ —ускорение поршня;
- $W_b = \ddot{x}$ —ускорение бойка;
- φ —угол поворота кривошипа;
- $\omega = \dot{\varphi}$ —угловая скорость кривошипа;
- $\epsilon = \ddot{\varphi}$ —угловое ускорение кривошипа;
- t —время;
- h —шаг (интервал) времени, принятый в расчетах;
- T —период рабочего цикла;

A_6 —работа на бойке;
 N —мощность мотора;
 n —число оборотов в минуту;
 i —передаточное число между валом двигателя и валом кривошипа;
 E —кинетическая энергия;
 M_p —момент сил воздушного давления относительно вала кривошипа;
 M_q —движущий момент, обусловленный характеристикой мотора.
 M —суммарный крутящий момент на валу;
 J —момент инерции массы;
 Q_6 —вес бойка;
 Q_n —вес поршня;
 Q_w —вес шатуна;
 Q_m —вес корпуса молотка;
 $g=9,81 \text{ м/сек}^2$ —ускорение силы тяжести;
 z —число ударов бойка в минуту;
 u_m —путь корпуса молотка;
 $v_m = u_m$ —скорость корпуса молотка;
 $\alpha = 1,32$ —показатель политропы;
 $\beta = \frac{x}{x_0} = \frac{v_6 \text{ отскока}}{v_6 \text{ ударная}}$ —коэффициент восстановления при ударе;
 p —давление воздуха между бойком и поршнем;
 p_0 —атмосферное давление (принимаемое в дальнейшем $= 1 \text{ кг/см}^2$);
 $P = p \cdot B$ —результатирующая сила воздушного давления;
 F —сила инерции;
 Δ —разность;
 f —обозначение функции;
 $\eta = h\omega$
 $\xi = h^2 \ddot{x}$
 $\psi = h \ddot{\varphi}$

| | |
|--|--|
| $\left. \begin{array}{l} \eta = h\omega \\ \xi = h^2 \ddot{x} \\ \psi = h \ddot{\varphi} \end{array} \right\}$ | вспомогательные обозначения при расчете методом Адамса-Штермера. |
|--|--|

$*$ —среднее значение величины;
 k —переменный индекс $k = 0, 1, 2, \dots$
 b —индекс, относящийся к бойку;
 n —" " " к поршню;
 m —" " " к молотку.

Данное исследование рабочего процесса электроотбойного молотка с упругой (воздушной) связью проведено с учетом неравномерности движения мотора, при любой заданной характеристике двигателя. Кроме того, указан достаточно точный и простой метод расчета, позволяющий сравнительно быстро получить представление о рабочем процессе внутри молотка, а также и основные показатели, характеризующие его работу. Предварительное теоретическое исследование конструкции еще до ее изготовления дает возможность во-время устранить замеченные недочеты. Конечно, можно идти и чисто опытным путем, но этот путь более тяжел и дорог. Наилучшим сочетанием является взаимосвязь и дополнение теоретического и экспериментального методов исследования.

Проблема отбойного молотка еще не разрешена в полном объеме: промышленности нужен экономичный, надежный в работе, легкий молоток с пониженной отдачей. Пневматические молотки являются надежными и производительными, но слишком дорогими (взятые вместе со всем „пневматическим хозяйством“). Кроме того, большим недостатком их является значительная отдача. Электромеханические молотки, с точки зрения использования энергии, являются более экономичными, чем пневма-

тические, но и они в свою очередь имеют ряд существенных недостатков, как-то: малую работу удара (порядка 1 кгм); большой вес (до 15 кг), быстрый износ пружин и значительный нагрев.

В горной промышленности остро ощущается потребность в удовлетворительной конструкции электроотбойного молотка. Поломки и быстрый износ стальных пружин приводят конструктора к попыткам использовать в качестве упругого материала воздух.

Г. И. Малеев [11] дал конструкцию и расчет электропневматического молотка с двусторонней воздушной связью (рис. 1). Этот молоток имеет работу одного удара $A_6 = 3,0$ кгм при диаметре поршня $d = 3,2$ см и длине „воздушных пружин“ $l_1 = 3,6$ см и $l_2 = 5,8$ см. Но весь расчет молотка сделан в предположении, что угловая скорость постоянна, чего, конечно, не может быть, так как „упругие пружины“ l_1 и l_2 будут существенно влиять на поршень, а следовательно, и на движение мотора.

Старшим инженером конструкторского бюро ТЭМЗ Н. М. Батуевым предложена конструкция безредукторного электропневматического молотка, для которой подробное исследование динамики и рабочего процесса было выполнено бригадой работников Томского политехнического института (ТПИ) в составе проф. Х. Ф. Кетова, доц. П. М. Алабужева, асс. Н. Г. Шленкиной под руководством проф. Х. Ф. Кетова, согласно договору с ТЭМЗ в 1942 году [7].

В отчете, представленном заводу, было изложено численное решение задачи в предположении постоянства момента сил сопротивления и линейного закона характеристики мотора, а также выяснен рабочий процесс и основные конструктивные элементы, определяющие его работу, и разработана теория и расчет инерционного выключателя.

В отчете, представленном заводу, было изложено численное решение задачи в предположении постоянства момента сил сопротивления и линейного закона характеристики мотора, а также выяснен рабочий процесс и основные конструктивные элементы, определяющие его работу, и разработана теория и расчет инерционного выключателя.

Нужно отметить, что предложенный здесь нами метод численного решения являлся слишком громоздким. Кроме того, в работе совершенно не было затронуто явление отскока бойка и отдачи молотка; тем не менее данное исследование явилось первым на пути дальнейших работ по доведению конструкции до опытного образца и исследованию рабочего процесса в других механизмах с упругой (воздушной) связью.

Приведем здесь лишь техническую характеристику спроектированного молотка (описание его будет дано особо): средняя мощность на валу двигателя $N = 350$ вт; среднее число оборотов в минуту $n = 2800$, число ударов в минуту $z = 700$, работа удара на бойке $A_6 = 2$ кгм; вес бойка $Q_6 = 0,6$ кг; вес молотка (без пики) $Q_m = 11,5$ кг; диаметр поршня $d = 4,5$ см. При прекращении нажатия на пике молоток переходит на холостой ход.

Остановимся еще на конструкции электропневматического молотка ОЭМ-1 (рис. 2), разработанной по схеме рис. 3 (предложенной еще инженерами Э. А. Бернером и Н. И. Жадаевым) конструкторами ТЭМЗ Н. И. Шохор и М. Ф. Климовой под общим руководством главного конструктора Б. В. Суднишникова. При движении поршня из крайнего правого положения между поршнем и бойком создается разрежение, и избыточным давлением атмосферного воздуха боек перемещается влево. При движении поршня вправо начинается сжатие воздуха,

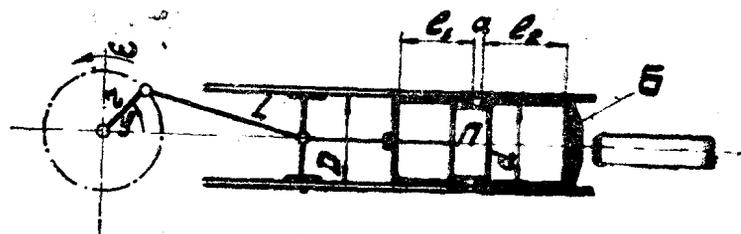


Рис. 1

бойк меняет направление движения и к концу своего хода приобретает некоторую ударную скорость.

С точки зрения простоты и прочности конструкция не встречает никаких возражений. Вопрос о надежности в работе (устойчивость, период цикла, роль начальных условий и т. д.) и достаточной эффективности требовал предварительного исследования—теоретического и эксперименталь-

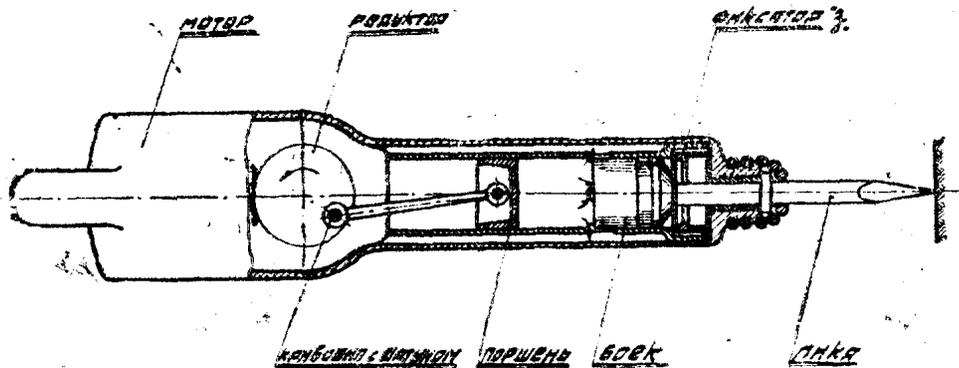


Рис. 2

ного. Первое было выполнено нами прежде, чем опытный образец был изготовлен. Техническая характеристика молотка ОЭМ-1 по проекту: $N = 390 \text{ г}$; $n = 2700 \text{ об/мин}$; $z = 700 \text{ уд/мин}$; $A_0 = 2,5 \text{ кгм}$; $Q_0 = 1,16 \text{ кг}$;

$Q_m = 13 \text{ кг}$; $d = 5,5 \text{ см}$. Молоток выключается (переходит на холостой ход) при прекращении нажатия на пик.

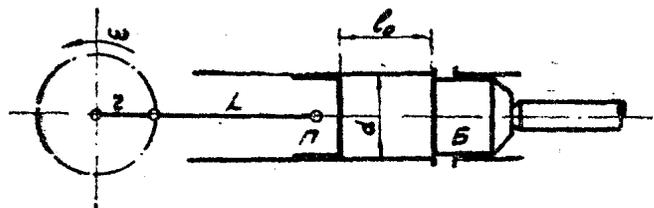


Рис. 3

В качестве расчетного примера в этой работе нами приведен электропневматический молоток ОЭМ-1. С принципиальной же стороны предложенным нами методом мож-

но рассчитать любой электропневматический молоток (или перфоратор).

§ 2. Уравнения движения бойка и кривошипа

Молоток с пневматической связью (рис. 3) является механизмом с двумя степенями свободы, поэтому представление о рабочем процессе молотка может быть получено при совместном решении двух дифференциальных уравнений: ур-ия движения бойка и ур-ия движения мотора (или поршня).

Составление уравнений движения будем вести на основе следующих предположений и допущений:

- 1) молоток расположен горизонтально;
- 2) силы трения в механизме отсутствуют;
- 3) количество воздуха между поршнем и бойком неизменно (утечки отсутствуют);

4) изменение давления воздуха в рабочем объеме происходит по закону $p = p_0 \left(\frac{l_0}{l}\right)^\alpha$, где α —показатель политропы.

Характеристику мотора считаем заданной.

Примечание. Ввиду специфических условий работы механизма, в расчете приходится пользоваться не только прямолинейной (или спрямленной) частью характеристики; поэтому при отсутствии графика или таблицы зависимости крутящего момента от скольже-

ния (или числа оборотов n), имея каталожные данные, можно воспользоваться первой формулой Клосса, погрешность которой, однако, иногда достигает 17—20%. Вторая формула Клосса, учитывающая сопротивление первичной обмотки двигателя, имеет более сложный вид и требует дополнительных данных. Инж. Л. В. Гейлер [4] предложил для крутящего момента асинхронного двигателя формулу, по точности не уступающую второй формуле Клосса, но более удобную для расчета и, по заключению автора формулы, пригодную для более широкого класса двигателей. По нашим вычислениям, формула Гейлера дает погрешность до 6% по отношению к характеристике, снятой с двигателя.

При указанных предположениях и согласно рис. 4, а также принятым обозначениям, уравнение движения бойка имеет вид:

$$\frac{Q_{\sigma}}{g} \cdot W_{\sigma} = -B \cdot (p - p_0) \quad (1)$$

Уравнение движения кривошипа можно записать в форме

$$J \cdot \varepsilon = M_q + M_p, \quad (2)$$

где $J = J_0 + \frac{Q_n + \frac{1}{3}Q_{ш}}{g} \cdot r^2 \cdot \left(\sin\varphi + \frac{\lambda}{2} \cdot \sin 2\varphi \right)^2$ — момент инерции движущихся масс, приведенный к оси кривошипа;

$J_0 = \text{Const}$ — момент инерции двигателя, кривошипа и $\frac{2}{3}$ массы шатуна;

$M_q = f(\omega)$ — движущий момент, обусловленный заданной характеристикой мотора.

$M_p = r \cdot B \cdot (p - p_0) \cdot \left(\sin\varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi \right)$ — момент сил воздушного давления на поршень относительно оси кривошипа. Величина M_p может быть положительной и отрицательной

в зависимости от давления p в цилиндре и угла φ поворота кривошипа.

Примечание. При учете сил сопротивления нужно полагать в ур-ии (1), кроме кулоновского трения, силы сопротивления воздуха, пропорциональные скорости или квадрату скорости бойка (в зависимости от величины v_{σ}), а в ур-ии (2) присоединить к правой части момент сил сопротивления, выраженный в процентах от M_p ; кроме того, при сравнительно больших значениях величин $r, \omega, Q_n, Q_{ш}$ необходимо учитывать на валу также момент от сил инерции поршня и шатуна.

Пути поршня и бойка будем определять расстоянием их от начального положения (по рис. 4а крайнее правое), а разность $x - s = u$ назовем относительным расстоянием между ними.

При $t = 0: \varphi = 0, u_0 = 0$.

Из рис. 4 видно, что $l_0 + s = l + x$; следовательно: $u = x - s = l_0 - l$,

откуда $l = l_0 - u$ и давление $p = p_0 \left(\frac{l_0}{l_0 - u} \right)^{\lambda}$.

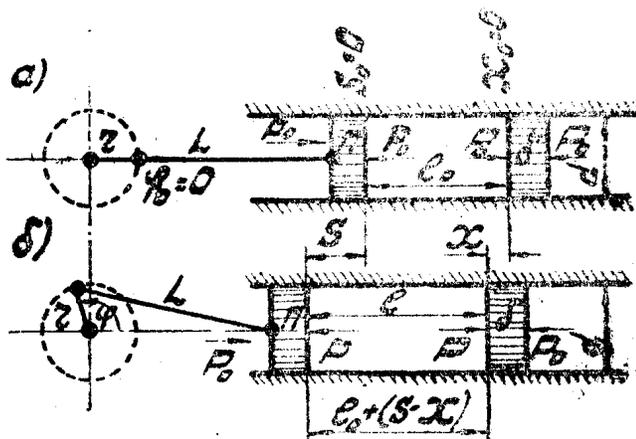


Рис. 4

Перемещение поршня s можно выразить в функции угла поворота φ формулой:

$$s = r \left[\left(1 + \frac{\lambda}{4} \right) - \left(\cos \varphi + \frac{\lambda}{4} \cdot \cos 2\varphi \right) \right].$$

Два совместных дифференциальных уравнения (1) и (2) описывают движение бойка и поршня, связанных между собой упругой (воздушной) связью. Так как эта связь не удовлетворяет закону Гука, то уравнения движения являются нелинейными дифференциальными уравнениями, что можно видеть, и непосредственно, представив их в следующей общей форме:

$$W_{\sigma} = \ddot{x} = a [x + b(\varphi)]^{-\alpha} + c = f[x(t), \varphi(t)], \quad (1)$$

$$\varepsilon = \ddot{\varphi} = \frac{M_q(\varphi) + b(\varphi) \cdot \ddot{x}}{J(\varphi)} = f_1[x(t), \varphi(t), \dot{\varphi}(t)]. \quad (2)$$

Приближенное решение системы (1) и (2) нелинейных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами может быть выполнено различными методами графически и численно, причем в последнем случае с любой степенью точности.

§ 3. Приближенное интегрирование уравнений движения (1) и (2)

Изложим сущность методов и порядок расчета системы уравнений (1) и (2) без вывода формул и строгих обоснований, так как последние можно найти в литературе, указанной в этом параграфе, а также в конце работы. Останавливаемся на данном вопросе потому, что поставленная уже давно задача расчета электропневматического молотка сравнительно долгое время не имела решения. Кроме того, полученные нами результаты позволяют сделать суждение о том, что этим же методом расчета можно пользоваться в более широких масштабах при изучении рабочего процесса различных механизмов и машин.

Вопрос о выборе метода и степени точности в значительной мере определяется количеством вычислительной работы, а также и назначением расчета. Здесь бесполезно вспомнить указание акад. А. Н. Крылова о том, что „точность вычислений должна соответствовать точности данных и той практической потребности, для которой оно производится“ [9, 486].

При подборе основных параметров (I_0 , λ , Q_0 , M_q), которые должны дать требуемый цикл, можно сделать расчет первым методом Эйлера, полагая давление p и крутящий момент на валу внутри каждого интервала (шага) Δt постоянными и равными их значениям в начале шага, иначе говоря—провести вычисления по формулам равнопеременного движения.

Вычислитель сам должен соизмерять интервал Δt в зависимости от характера изменения входящих в расчет величин (давления p и т. д.).

Достоинством этого метода расчета является его простота и возможность по мере надобности сразу же изменять шаг Δt ; недостатком следует считать накопление ошибок и сравнительно большую погрешность по отношению к расчету более точными методами. В нашей работе при одних и тех же значениях шага Δt погрешность составляла до 25% по различным показателям.

Хороший и простой способ решения, дающий достаточно точные результаты, указан проф. П. С. Тимошенко [22] и проф. Е. Л. Николаи [17] (различие в расчете в указанных руководствах незначительно). Проф. В. П. Ветчинкин [3, 305] относит метод интегри-

рования Тимошенко—Николаи к числу „незабываемых“ для вычислителя.

Поясним порядок вычислений в применении к нашей задаче совместного решения уравнений движения бойка и кривошипа:

$$W_0 = \ddot{x} = f(x, \varphi) \dots (1) \quad \text{и} \quad \varepsilon = \ddot{\varphi} = f_1(\varphi, \dot{\varphi}, x) \dots (2),$$

где $x = x(t)$, $\varphi = \varphi(t)$ и $\dot{\varphi} = \dot{\varphi}(t)$.

Пусть при $t = t_k$, где $k = 0, 1, 2, 3, \dots$, известны значения: $x_k, \varphi_k, \dot{x}_k, \dot{\varphi}_k$, а следовательно,

$$\ddot{x}_k = f(x_k, \varphi_k) \quad \text{и} \quad \ddot{\varphi}_k = f_1(\varphi_k, \dot{\varphi}_k, x_k).$$

При переходе от значения (k) к следующему $(k+1)$ за интервал $\Delta t = t_{k+1} - t_k$ находим в первом приближении для момента времени t_{k+1} значения:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_{k+1} &= \dot{x}_k + \ddot{x}_k \Delta t, \\ x_{k+1} &= x_k + \frac{\dot{x}_k + \dot{x}_{k+1}}{2} \cdot \Delta t. \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \dot{\varphi}_{k+1} &= \dot{\varphi}_k + \ddot{\varphi}_k \Delta t, \\ \varphi_{k+1} &= \varphi_k + \frac{\dot{\varphi}_k + \dot{\varphi}_{k+1}}{2} \cdot \Delta t. \end{aligned}$$

Далее из ур-ий (1) и (2) определяем в первом приближении

$$\ddot{x}_{k+1} = f[(x_{k+1}), (\varphi_{k+1})] \quad \text{и} \quad \ddot{\varphi}_{k+1} = f_1[(\varphi_{k+1}), (\dot{\varphi}_{k+1}), (x_{k+1})].$$

Наконец, более точные значения для момента времени t_{k+1} во втором приближении получим:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_{k+1} &= \dot{x}_k + \frac{\ddot{x}_k + \ddot{x}_{k+1}}{2} \cdot \Delta t, \\ x_{k+1} &= x_k + \frac{\dot{x}_k + \dot{x}_{k+1}}{2} \cdot \Delta t. \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \dot{\varphi}_{k+1} &= \dot{\varphi}_k + \frac{\ddot{\varphi}_k + \ddot{\varphi}_{k+1}}{2} \cdot \Delta t, \\ \varphi_{k+1} &= \varphi_k + \frac{\dot{\varphi}_k + \dot{\varphi}_{k+1}}{2} \cdot \Delta t. \end{aligned}$$

Далее в том же порядке ведем вычисления для следующего интервала и т. д. Весь вычислительный материал располагаем таблично (по две строки на каждую точку).

„Взяв промежутки Δt достаточно малыми и проделав вычисления для каждого значения t дважды, как указано выше, чтобы получить вторую степень приближения, мы можем этим способом численного интегрирования получить всегда точность, достаточную для практических применений“ [22, 85].

Погрешность вычислений этим методом, при сравнении с вычислениями более точными методами (примерно в тех же интервалах), в нашей работе по отдельным показателям составляла 2,8%. (Небесполезно вспомнить, что степень точности любым методом определяется в значительной мере терпением вычислителя и может быть значительно повышена путем уменьшения интервала).

В целях сокращения вычислительной работы проф. Ветчинкин предлагает „метод средних ординат“, который дает почти такую же точность, как и метод Тимошенко—Николаи.

„Недостатком способа Тимошенко—Николаи является необходимость два раза вычислять функцию f для получения каждой точки. Между тем, для продолжения процесса интегрирования имеется возможность получать почти такую же точность при помощи одного вычисления функ-

ции f на каждую точку. Для этого следует вычислять площадь кривой с помощью ординаты, проведенной в середине участка интегрирования, который расширяется до длины $2h$ [2, 88].

В применении к решению нашей задачи, имея уравнения

$$\ddot{x} = f[x, \varphi] \dots (1) \quad \text{и} \quad \ddot{\varphi} = f_1[\varphi, \dot{\varphi}, x] \dots (2),$$

а также начальные значения величин $t_0, x_0, \varphi_0, \dot{x}_0, \dot{\varphi}_0$, вычисляем методом Тимошенко—Николаи для следующей точки t_1 значения: $x_1, \dot{x}_1, \varphi_1, \dot{\varphi}_1$ и переходим в последующих вычислениях на метод „средних ординат“.

Для $t = t_2$

$$\left. \begin{aligned} x_2 &= x_0 + 2h \cdot \dot{x}_1, \\ \dot{x}_2 &= \dot{x}_0 + 2h \ddot{x}_1. \end{aligned} \right| \begin{aligned} \varphi_2 &= \varphi_0 + 2h \cdot \dot{\varphi}_1, \\ \dot{\varphi}_2 &= \dot{\varphi}_0 + 2h \ddot{\varphi}_1. \end{aligned}$$

Зная значения $x_2, \dot{x}_2, \varphi_2, \dot{\varphi}_2$, вычисляем из ур-ий (1) и (2) значения \ddot{x}_2 и $\ddot{\varphi}_2$ и переходим к следующей точке t_3 .

$$\left. \begin{aligned} x_3 &= x_1 + 2h \cdot \dot{x}_2, \\ \dot{x}_3 &= \dot{x}_1 + 2h \ddot{x}_2. \end{aligned} \right| \begin{aligned} \varphi_3 &= \varphi_1 + 2h \cdot \dot{\varphi}_2, \\ \dot{\varphi}_3 &= \dot{\varphi}_1 + 2h \ddot{\varphi}_2. \end{aligned}$$

Из уравнений (1) и (2) находим \ddot{x}_3 и $\ddot{\varphi}_3$ и т. д.

Основным недостатком этого метода расчета является ограниченность его применения, так как, имея начальные значения функции, следующее ее значение нужно вычислять иным методом (что существенно при изменении шага h , особенно вблизи пиковых положений).

Для того чтобы иметь общую картину рабочего процесса механизма без значительной затраты вычислительного труда, вначале нужно сделать расчет „комбинированным методом“—методом Тимошенко—Николаи на первой точке взятого интервала и вблизи пиковых положений, на остальных же точках применять „метод средних ординат“ и даже 1-й метод Эйлера, если кривая давления воздуха изменяется медленно.

Для ускорения расчета и устранения пестроты в вычислениях целесообразно в качестве независимого переменного вместо времени t взять угол φ поворота кривошипа. Тогда имеется возможность заранее заготовить таблицу значений s и J в функции угла φ . (Кстати, такие таблицы для различных λ уже имеются в литературе по двигателям внутреннего сгорания). Кроме того, весьма полезно заготовить еще две таблицы (что остается в силе и по отношению к другим способам вычисления):

1) по характеристике двигателя—зависимость движущего момента на валу кривошипа от его угловой скорости, т. е. $M_q = f(\omega)$, вычисленную примерно через $\Delta\omega = 0,5$ 1/сек;

2) таблицу значений давления в функции относительного расстояния между бойком и поршнем, т. е. $p = f(u)$.

Интервал при составлении таблиц должен быть выбран так, чтобы восьмой долей разности второго порядка можно было пренебречь, т. е. считать в данном интервале изменение величины по линейному закону. Ввиду однообразия работы составление таблиц не требует большого труда, и время, затраченное на их составление, вполне окупается при дальнейшем расчете; кроме того, имеется возможность быстро сделать новый расчет, изменив какой-нибудь параметр (например, Q_0 и т. д.). Полезно также вычисленные значения за один прием сразу же нанести на график, благодаря чему незамеченные случайные ошибки при вычислении могут быть своевременно выявлены.

Приняв в качестве независимого переменного угол φ , уравнения движения бойка (1) и кривошипа (2) записываем в форме

$$W_0 = \frac{p_0 B g}{Q_0} \left[1 - \left(\frac{l_0}{l} \right)^2 \right]$$

$$\text{и } \Delta E = \Delta \left[J \frac{\omega^2}{2} \right] =$$

$$= (M_q + M_p) \Delta \varphi,$$

после чего расчет ведем на одном листе по следующей универсальной схеме, представленной таблицей I.

Имея начальные значения $\varphi_0, s_0, x_0, \dot{x}_0, \ddot{x}_0, p_0, \omega_0$, указанные в таблице, покажем порядок заполнения остальных граф и переход с следующей строке, для которой эти величины будут новыми исходными. Графы (3), (5), (14), (17), (22) заполняются по мере надобности из составленных заранее таблиц. В первом приближении (обозначено круглыми скобками) при переходе от начального положения к следующей точке, т. е. от $k=0$ до $k=(1)$, сделаем расчет первым методом Эйлера.

Прежде всего находим величину суммарного момента M_0 (графа 18), и приращение кинетической энергии $(\Delta E_0) = M_0 \Delta \varphi$ (графа 20); затем для следующей строки в графе (21) определяем кинетическую энергию $(E_1) = E_0 + (\Delta E_0)$. Зная (из таблицы) значение приведенного момента J_1 , находим угловую скорость (ω_1) , (графа 23); в графе (24) пишем приращение угловой скорости $(\Delta \omega_0)$, а в графу (25) записываем среднюю угловую скорость за интервал $\Delta \varphi$ и равную $(\omega^*_{01}) = \omega_0 + \frac{(\Delta \omega_0)}{2}$; в графе (26) оп-

Таблица I.

| | | | | | | |
|----|---------------------------------|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 27 | $2 \Delta t = 2$ | t_0 | t_1 | t_2 | t_3 | t_4 |
| 26 | Δt | (Δt_0) | Δt_1 | Δt_2 | Δt_3 | Δt_4 |
| 25 | ω^* | (ω^*_{01}) | ω_{01} | ω_{12} | ω_{23} | ω_{34} |
| 24 | $\Delta \omega$ | $(\Delta \omega_0)$ | $\Delta \omega_0$ | $\Delta \omega_1$ | $\Delta \omega_2$ | $\Delta \omega_3$ |
| 23 | $\omega = \sqrt{2g/l}$ | ω_0 | (ω_1) | ω_2 | ω_3 | ω_4 |
| 22 | J | J_0 | J_1 | J_2 | J_3 | J_4 |
| 21 | E | E_0 | (E_1) | E_2 | E_3 | E_4 |
| 20 | $\Delta E = M_0 \Delta \varphi$ | (ΔE_0) | ΔE_0 | ΔE_1 | ΔE_2 | ΔE_3 |
| 19 | M | M_0 | (M_1) | M_1 | M_2 | M_3 |
| 18 | $M = M_p + M_q$ | M_0 | (M_1) | M_1 | M_2 | M_3 |
| 17 | M_p | | | | | |
| 16 | M_q | | | | | |
| 15 | $P-1$ | | | | | |
| 14 | P | P_0 | (P_1) | P_1 | P_2 | P_3 |
| 13 | $U = x - s$ | U_0 | (U_1) | U_1 | U_2 | U_3 |
| 12 | $M \ddot{x} = x^*$ | \ddot{x}_0 | (\ddot{x}_1) | \ddot{x}_1 | \ddot{x}_2 | \ddot{x}_3 |
| 11 | $M \dot{x} = x^*$ | \dot{x}_0 | (\dot{x}_1) | \dot{x}_1 | \dot{x}_2 | \dot{x}_3 |
| 10 | $V \dot{x} = x^*$ | (\dot{x}_0) | \dot{x}_0 | \dot{x}_1 | \dot{x}_2 | \dot{x}_3 |
| 9 | $\Delta V \dot{x} = \Delta x$ | $(\Delta \dot{x}_0)$ | $\Delta \dot{x}_0$ | $\Delta \dot{x}_1$ | $\Delta \dot{x}_2$ | $\Delta \dot{x}_3$ |
| 8 | $V \dot{x} = x$ | \dot{x}_0 | (\dot{x}_1) | \dot{x}_1 | \dot{x}_2 | \dot{x}_3 |
| 7 | $x \Delta x$ | (Δx_0) | Δx_0 | Δx_1 | Δx_2 | Δx_3 |
| 6 | x | x_0 | (x_1) | x_1 | x_2 | x_3 |
| 5 | s | s_0 | (s_1) | s_1 | s_2 | s_3 |
| 4 | $V \dot{s}$ | | | | | |
| 3 | \dot{s} | \dot{s}_0 | (\dot{s}_1) | \dot{s}_1 | \dot{s}_2 | \dot{s}_3 |
| 2 | s | s_0 | (s_1) | s_1 | s_2 | s_3 |
| 1 | φ | 0 | (1) | 1 | 2 | 3 |
| | | | | | | 4 |

ределяем промежуток времени $(\Delta t_{01}) = \frac{\Delta \varphi}{\omega^*_{01}}$ движения кривошипа. В графе

(9)—приращение скорости бойка: $\Delta \dot{x}_0 = \dot{x}_0(\Delta t_{01})$, а в графе (8)—скорость бойка: $(x_1) = \dot{x}_0 + (\Delta \dot{x}_0)$. В графу (7) впишем приращение пути бойка за интервал $\Delta \varphi$:

$$(\Delta x_0) = \dot{x}_0 \cdot (\Delta t_{01}) + \frac{\ddot{x}_0(\Delta t_{01})^2}{2} = \left[\dot{x}_0 + \frac{(\Delta \dot{x}_0)}{2} \right] \cdot (\Delta t_{01}).$$

Тогда в графу (6) запишем: $(x_1) = x_0 + (\Delta x_0)$. В графу (5) вносим (из таблиц) путь поршня s и далее заполняем (13), (14), (15), (16) для значения угла (φ_1). В графе (4) для контроля (и сравнения с v_0) помещаем скорость поршня, определяемую формулой

$$v_n = \omega \cdot r \cdot \left[\sin \varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi \right].$$

Контрольным моментом в расчете является равенство: $v_0 = v_n$ при экстремальных значениях давления p . В такой же последовательности ведется вычисление при заполнении третьей строки и т. д.

Метод Тимошенко—Николаи

Если принять значения, полученные во второй строке, за первое приближение, обозначаемое круглыми скобками (), то по средним значениям скоростей v^*_{01} , (графа 10), и ускорений W^*_{01} , (графа 12), можно во втором приближении найти скорость $\dot{x}_1 = \dot{x}_0 + \frac{\dot{x}_0 + (\dot{x}_1)}{2} \cdot \Delta t_{01}$ и путь бойка $x_1 = x_0 + \frac{x_0 + x_1}{2} \cdot \Delta t_{01}$ для первой точки.

При этом время

$$\Delta t_{01} = \frac{\Delta \varphi}{\omega^*_{01}} = \frac{\Delta \varphi}{\frac{\omega_0 + \omega_1}{2}}$$

определится из графы (26), после того как в ΔE_0 , (графа 20), для множителя при $\Delta \varphi$ мы вставим среднюю величину суммарного момента $M_{01}^* = \frac{M_0 + (M_1)}{2}$ и определим: $E_1 = E_0 + \Delta E_0$, (графа 21), и ω_1 , (графа 28).

Дальнейший процесс вычислений выполняется в той же последовательности.

Таким образом, взяв в качестве независимого переменного угол φ , и здесь имеем возможность сделать расчет во втором приближении, не изменяя схемы расчета, повторив лишь дважды вычисления для каждой точки.

Метод „средних“ ординат

Имея законченными начальную и первую строки, заполняем вторую строку ($k=2$).

Из графы (21): $E_2 = E_0 + \Delta E_{02} = E_0 + M_1 \cdot 2\Delta \varphi$; из (графы 23) определяем ω_2 и приращение угловой скорости $\Delta \omega_1 = \omega_2 - \omega_1$, среднюю угловую скорость кривошипа $\omega^*_{12} = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} = \omega_1 + \frac{\Delta \omega_1}{2}$, (графа 25), и время

$\Delta t_{12} = \frac{\Delta \varphi}{\omega^*_{12}}$ из графы (26). Скорость бойка (графа 8): $\dot{x}_2 = \dot{x}_0 + \ddot{x}_1(t_2 - t_1) =$

$= \dot{x}_0 + \dot{x}_1(\Delta t_{01} + \Delta t_{12}) = \dot{x}_0 + \Delta \dot{x}_{02}$; путь бойка (графа 6): $x_2 = x_0 + \Delta x_{02} =$

$= x_0 + x_1(\Delta t_{01} + \Delta t_{12})$; вычисляем: \dot{x}_2 , (графа 11), и M_2 , (графа 18). Таким образом заполним вторую строку. Для третьей строки поступаем аналогично: $E_3 = E_1 + M_2 \cdot 2\Delta \varphi$. Отсюда $\Delta t_{23} = \frac{\Delta \varphi}{\omega^*_{23}}$ и для бойка:

$$\dot{x}_3 = \dot{x}_1 + \ddot{x}_2 (\Delta t_{12} + \Delta t_{23}),$$

$$x_3 = x_1 + \dot{x}_2 (\Delta t_{12} + \Delta t_{23}).$$

Вычисляем \dot{x} и M_3 и т. д. Здесь „средние“ значения ординат скорости \dot{x}_3 и ускорения \ddot{x}_3 соответствуют середине интервала по φ и, вследствие неравномерности движения кривошипа, не совпадают со серединой интервала времени, но это различие при расчете несущественно.

Для того чтобы выяснить степень точности рассмотренных методов, нами было проведено, на одном из вариантов, сравнение результатов с вычислениями по методу Адамса-Штермера. Этот метод наиболее распространен в среде инженеров благодаря работам академика А. Н. Крылова. По заключению проф. Ветчинкина, акад. Крылов изложил метод „с исчерпывающей ясностью и полнотой, с подробными указаниями для начала и продолжения процесса интегрирования и с многочисленными примерами применения“ [2, 6].

Проф. Маркович [12] указывает на применение этого же метода к исследованию работы пневматического молота (правда, здесь мы имеем только одно уравнение движения бабы молота).

Чтобы составить представление об объеме работы методом Адамса-Штермера, а также о порядке ее выполнения в применении к нашей задаче, покажем, как продолжать таблицы, ведя вычисления с разностями второго порядка. Имея уравнения движения

$$W_0 = \ddot{x} = f[x, \varphi] \dots (1) \text{ и } \varepsilon = \ddot{\varphi} = f_1[\varphi, \omega, x] \dots (2),$$

составляем основную таблицу II, являющуюся итоговой для каждой точки и заполнение которой не требует особых пояснений, и вспомогательную таблицу III, в которой будем полагать заполненными все графы до (k) строки включительно. Здесь введены обозначения:

$$\xi_k = h^2 \cdot \omega_{0k} = h^2 \cdot f [x_k, \varphi];$$

$$\psi_k = h \cdot \varepsilon_k = h \cdot f_1 [\varphi_k, \omega_k, x_k];$$

$$\eta_k = h \cdot \omega_k,$$

где $h = \Delta t$; $x = x(t)$; $\varphi = \varphi(t)$; $\omega = \omega(t)$.

Тогда по нижеприведенным формулам и в соответствующем порядке продолжаем заполнение таблицы III, т. е. совместно решаем систему уравнений (1), (2).

$$1) \quad \Delta \omega_k = \psi_k + \frac{1}{2} \Delta \psi_{k-1} + \frac{5}{12} \Delta^2 \psi_{k-2} \quad \text{графа} \quad (12)$$

$$2) \quad \omega_{k+1} = \omega_k + \Delta \omega_k \quad \text{„} \quad (11)$$

$$3) \quad \Delta \varphi_k = \eta_k + \frac{1}{2} \Delta \eta_{k-1} + \frac{5}{12} \Delta^2 \eta_{k-2} \quad \text{„} \quad (17)$$

$$4) \quad \varphi_{k+1} = \varphi_k + \Delta \varphi_k \quad \text{„} \quad (16)$$

$$5) \quad \eta_{k+1} = h \cdot \omega_{k+1} \quad \text{„} \quad (18)$$

$$6) \quad \Delta \eta_k = \eta_{k+1} - \eta_k \quad \text{„} \quad (19)$$

$$7) \quad \Delta^2 \eta_{k-1} = \Delta \eta_k - \Delta \eta_{k-1} \quad \text{„} \quad (20)$$

$$8) \quad \Delta^2 x_{k-1} = \xi_k + \frac{1}{12} \Delta^2 \xi_{k-2} \quad \text{„} \quad (7)$$

$$9) \quad \Delta x_k = \Delta x_{k-1} + \Delta^2 x_{k-1} \quad \text{„} \quad (6)$$

- 10) $x_{k+1} = x_k + \Delta x_k$ " (5)
 11) $\Delta \dot{x} = \frac{1}{h} \left(\xi_k + \frac{1}{2} \Delta \xi_{k-1} + \frac{5}{12} \Delta^2 \xi_{k-2} \right)$ " (4)
 12) $v_0 = \dot{x}_{k+1} = \dot{x}_k + \Delta \dot{x}_k$ " (3)
 13) $\xi_{k+1} = h^2 \cdot W_{k+1} = h^2 \cdot f [x_{k+1}, \varphi_{k+1}]$ " (8)
 14) $\Delta \xi_k = \xi_{k+1} - \xi_k$ " (9)
 15) $\Delta^2 \xi_{k-1} = \Delta \xi_k - \Delta \xi_{k-1}$ " (10)
 16) $\psi_{k+1} = h \cdot \varepsilon_{k+1} = h \cdot f_1 [\varphi_{k+1}, \omega_{k+1}, x_{k+1}]$ " (13)
 17) $\Delta \psi_k = \psi_{k+1} - \psi_k$ " (14)
 18) $\Delta^2 \psi_{k-1} = \Delta \psi_k - \Delta \psi_{k-1}$ " (15)

Далее заполняем до конца $(k+1)$ строку таблицы II и в том же порядке ведем расчет для $(k+2)$ строки, начиная с $\Delta \omega_{k+1}$ и т. д. Здесь на каждую точку вычисление ведется один раз. Весь вычислительный материал можно располагать и на одной таблице, т. е. объединить таблицы II и III.

Нужно отметить, что для возможности применения метода Адамса-Штермера вычисления начала таблиц должны быть проведены предварительно способом последовательных приближений (до третьего приближе-

Таблица II

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|----------------------------|-----|-----|-----|---------|-----|-------|-------|-------|-------|-----|-----|----------|-------|-------|-------------|-------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
| x | y | $\sin \frac{1}{2} \sin 2y$ | J | S | x | $U-x-S$ | P | $P-I$ | W_0 | M_p | M_q | M | E | ω | V_0 | V_n | $U=V_0-V_n$ | t_0 |
| 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

ния включительно, если ограничиться разностями второго порядка). Дальнейшее заполнение таблиц производится по методу Адамса-Штермера (таблица III). Однако при быстром изменении давления воздуха в цилиндре происходит очень быстрое изменение ряда величин (v_0, ω, x), вторые разности уже не постоянны, поэтому приходится вводить разности высших порядков, что усложняет вычисления. Если же уменьшить интервал, то нужно заново (путем последовательных приближений) составлять начало таблиц, что опять-таки делает вычисления более сложными. Выгоднее вначале взять меньший интервал и по ходу дела, если нужно, произвести удвоение интервала (соответствующая схема и пример рассмотрены академиком Крыловым [9]).

Вопрос о точности вычисления решается так. В электроотбойном молотке скорость бойка меняется очень быстро, поэтому необходимо следить, чтобы вторые разности $\Delta^2 \xi$ для бойка были постоянны и соответствовали выбранной точности вычислений. Пусть, например, из предварительных расчетов известно, что ход бойка $x = 10$ см. Следовательно, за один оборот кривошипа можно приближенно считать пройденный путь бойком ≈ 20 см. При допущении погрешности 0,1% наибольшая ошибка должна быть 0,2 мм. Принимая интервал, соответствующий повороту кривошипа $\Delta \varphi = 15^\circ$, находим, что ошибка на одно вычисление не должна численно превышать $\frac{0,2}{24} = 0,008$ мм.

В формуле

$$\Delta^2 x_{k-1} = \xi_k + \frac{1}{12} \Delta^2 \xi_{k-2} + \frac{1}{12} \Delta^2 \xi_{k-3}$$

величина отбрасываемого первого члена не должна превосходить $0,008 \ll \ll \frac{1}{12} \Delta^2 \xi_{k-3}$. Если это правило выполняется до конца расчета, то погрешность вычислений за цикл не превышает 0,1%. При допустимой погрешности в 0,1%, в результате вычислений, число верных знаков должно быть равно трем [1, 18].

Из известных нам способов графического расчета наиболее прост и пригоден, в применении к решению данной задачи, способ инж. Б. В. Суднишникова [20], но и здесь, помимо графической работы, неизбежен ряд вычислений, сопровождающих построение графиков; помимо этого, отсутствует критерий, позволяющий судить о степени точности расчета.

Укажем еще на дополнительный и весьма эффективный метод расчета—метод динамического подобия, разработанный в применении к молоткам инж. Суднишниковым [19] и позволяющий, при наличии точного расчета данного типа молотка, произвести серию расчетов для одинаковых степеней сжатия других, подобных в динамическом отношении, молотков.

§ 4. „Комбинированный метод“ расчета, на примере молотка ОЭМ-1

Исходные данные для расчета электропневматического молотка ОЭМ-1: $r = 3,8$ см; $L = 9,5$ см; $l_0 = 6,8$ см; $d = 5,5$ см; $Q_0 = 1,16$ кг; $Q_n = 0,19$ кг; $Q_{ш} = 0,12$ кг; $Q_m = 13$ кг; $J_0 = 8,7 \cdot 10^{-4}$ кг. м. сек²; $\alpha = 1,32$; $i = \frac{10}{38} = 0,263$;

энергия при отскоке не выше 10% от ударной (здесь принято для коэффициента восстановления значение $\beta = \sqrt{0,1} = 0,316$); продолжительность удара $\Delta t_0 = 0,001$ сек. Характеристика двигателя изображена на рис. 5. По-

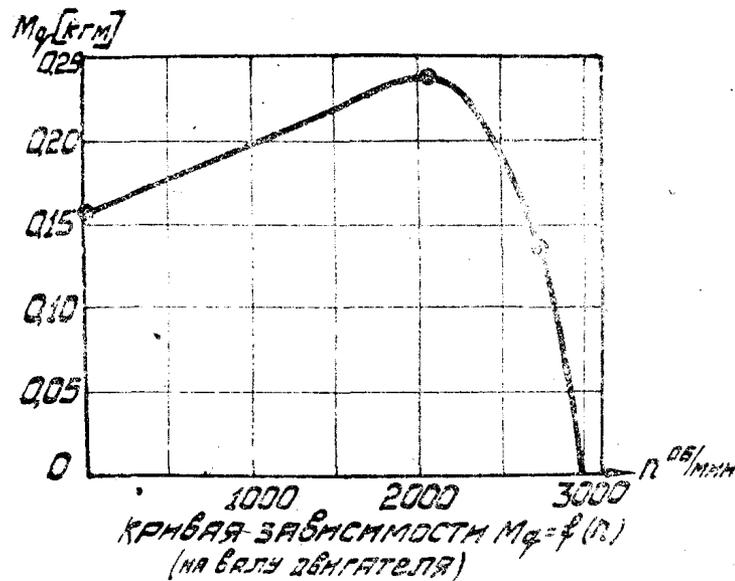


Рис. 5

ложение молотка горизонтальное (рис. 3); переход с холостого хода на рабочий осуществляется нажатием на пистолет. Принимаем при $t_0 = 0$:

$$\varphi_0 = 0; x_0 = s_0 = 0; l = l_0; p_0 \approx 1 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}; v_0 = s_0 = 0; \omega_0 = 82,5 \text{ 1/сек.}$$

Вначале вычисления от $\varphi = 0$ до $\varphi = 180^\circ$ велись с интервалом $\Delta\varphi = 15^\circ$; вблизи пикового положения $\Delta\varphi = 2,5^\circ$. При установившемся движении из 44 точек за один оборот кривошипа двенадцать были вычислены методом Тимошенко—Николаи, остальные же 32 „методом средних ординат“. Время, затраченное на расчет одного оборота кривошипа ≈ 10 часам работы. Результаты расчета за 6 оборотов, полученные описанным методом, объединены в табл. IV.

ТАБЛИЦА IV

| Оборот | x_{max} (см) | v_b^{max} (см/сек) | v_b^{min} (см/сек) | $v_b^{удар}$ (см/сек) | p^{max} (кг/см ²) | p^{min} (кг/см ²) | $\varphi_{удар}$ ($^\circ$) | ω^{max} (1/сек) | ω^{min} (1/сек) | Время оборота (сек.) |
|--------|-------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| 1 | 9,67 | +362 | -798 | -781 | 9,83 | 0,42 | 302,5 | 82,5 | 37,0 | 0,0921 |
| 2 | 10,44 | +345 | -741 | -722 | 7,62 | 0,52 | 301,7 | 80,5 | 50,4 | 0,0889 |
| 3 | 6,73 | +298 | -749 | -749 | 8,78 | 0,34 | 340,0 | 83,2 | 44,0 | 0,0853 |
| 4 | 8,52 | +255 | -721 | -717 | 6,22 | 0,55 | 320,6 | 82,0 | 47,8 | 0,0885 |
| 5 | 7,82 | +248 | -751 | -750 | 9,60 | 0,45 | 322,8 | 82,5 | 44,4 | 0,0887 |
| 6 | 7,76 | +243 | -739 | -739 | 9,34 | 0,46 | 323,5 | 82,5 | 43,7 | 0,0892 |

В таблице V представлены значения x , p , v_b , ω за каждый оборот для $\varphi = 180^\circ$ и $\varphi = 360^\circ$.

ТАБЛИЦА V

| Оборот | $\varphi = 180^\circ$ $S = 7,6$ см | | | | $\varphi = 360^\circ$ $S = 0$ | | | |
|--------|------------------------------------|------|-------|----------|-------------------------------|------|-------|----------|
| | x | p | v_b | ω | x | p | v_b | ω |
| 1 | 4,23 | 0,56 | +230 | 80,4 | 3,59 | 3,58 | -91 | 59,1 |
| 2 | 6,50 | 0,82 | +339 | 79,9 | 3,16 | 2,81 | +76 | 71,2 |
| 3 | 0,62 | 0,35 | +135 | 80,0 | 1,54 | 1,50 | +208 | 55,2 |
| 4 | 4,98 | 0,61 | +180 | 81,0 | 2,23 | 1,90 | +167 | 64,8 |
| 5 | 3,32 | 0,48 | +161 | 80,8 | 2,44 | 2,06 | +162 | 62,5 |
| 6 | 3,23 | 0,50 | +158 | 80,5 | 2,37 | 1,98 | +160 | 59,6 |

Для наглядности полученные результаты представлены в форме графиков.

Характеристика рабочего процесса, на основе таблиц IV—V и графиков

Остановимся на некоторых основных особенностях переходного режима, представленного на рис. 6 графиками изменения пути бойка, поршня и угловой скорости кривошипа в функции угла φ поворота кривошипа.

В силовом отношении первый оборот является наиболее трудным для механизма, так как начальная скорость бойка равна нулю; но вследствие продолжительного вакуума боек при движении влево приобретает значительную скорость: $\max v_b = 362 \text{ см/сек}$, которую он должен потерять при дальнейшем сжатии воздуха, причем здесь имеет место наибольшее сжатие воздуха и снижение угловой скорости механизма. После удара при $\varphi = 302,5^\circ$ имеем встречное движение бойка и поршня, вследствие чего происходит значительное изменение начальных условий для второго оборота.

Как видно из таблицы V, в конце первого оборота давление $p = 3,58 \text{ кг/см}^2$, и боек меняет направление движения, имея скорость $v_b = -91 \text{ см/сек}$, и при $\varphi = 55^\circ$ происходит вторичный (более слабый сопровождающий) удар, после которого боек имеет начальную скорость $v_b = +95 \text{ см/сек}$ и движется в одном направлении с поршнем; так как относительное расстояние между ними меньше, чем в первом случае, то меньше и вакуум, боек разгоняется влево до скорости $\max v_b = +345 \text{ см/сек}$. В результате при сжатии воздушной подушки получается $p_{\max} = 7,62 \text{ кг/см}^2$. Таким образом, боек, имея начальную скорость при наличии разрежения, а затем сравнительно небольшого сжатия, проходит путь $x_{\max} = 10,44 \text{ см}$. При втором основном ударе, вследствие меньшего давления (и вакуума), боек имеет меньшую, чем при первом ударе, скорость удара ($v_{\text{б удара}} = -722 \text{ см/сек}$), а следовательно, и меньшую скорость отскока. При встречном движении бойка и поршня от $\varphi = 301,7^\circ$ до 360° пройденный бойком путь к началу третьего оборота равен $x = 3,16 \text{ см}$, чему соответствует давление $p = 2,81 \text{ кг/см}^2$; происходит запаздывание в изменении направления скорости бойка и при третьем обороте кривошипа, второй сопровождающий удар получается при $\varphi = 135^\circ$, имея скорость отскока, равную $+4,1 \text{ см/сек}$; вследствие этого к 180° третьего оборота путь бойка $x = 0,62 \text{ см}$. Здесь имеем наименьшее давление в рабочей части цилиндра $p_{\min} = 0,35 \text{ кг/см}^2$ и быстрое нарастание скорости бойка; но так как время движения бойка от $\varphi = 135^\circ$ значительно меньше, чем в предыдущем обороте, и кроме того, начальная скорость после отскока мала, то пройденный бойком путь влево $x_{\max} = 6,73 \text{ см}$. Повышенное же давление $p_{\max} = 8,78 \text{ кг/см}^2$ объясняется тем, что при данном положении бойка сравнительно малы смещения поршня от начального положения, поэтому $u = x - s$ велико. При третьем обороте, по указанным причинам ударная точка смещается ($\varphi_{\text{удар}} = 340^\circ$), вследствие чего от момента удара до конца оборота (т. е. от 340° до 360°) время движения бойка меньше, чем в предыдущем случае, и боек к концу третьего оборота проходит путь $x = 1,5 \text{ см}$. Давление в цилиндре недостаточно для того, чтобы изменить направление скорости движения бойка; таким образом, здесь уже отсутствует вторичный сопровождающий удар. При четвертом обороте относительные расстояния между бойком и поршнем сравнительно невелики, поэтому не велика и степень сжатия ($p_{\max} = 6,22 \text{ кг/см}^2$); наименьшая скорость бойка $v_b = -721 \text{ см/сек}$, но при наличии вакуума (так как

расстояние между бойком и поршнем в этот момент больше начального) происходит потеря в скорости, и к моменту удара, при $\varphi = 320,6^\circ$, ударная скорость $V_6 = -717,0$ см/сек.

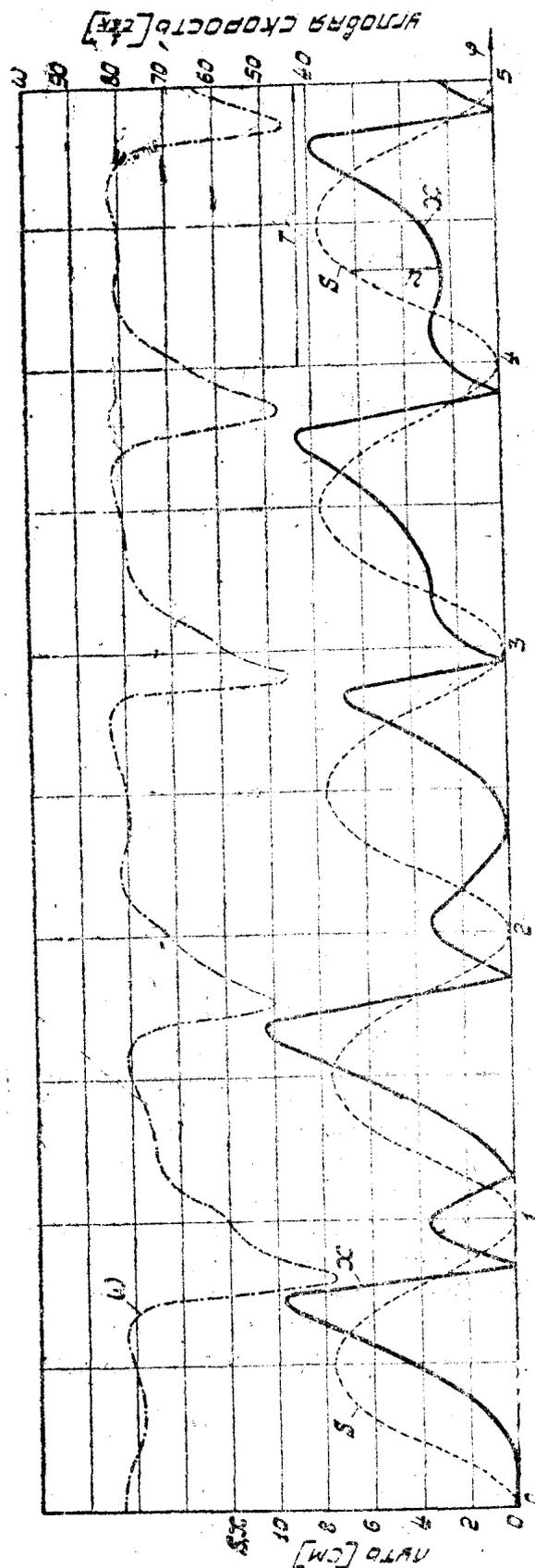
К началу пятого оборота кривошипа боек от момента удара проходит расстояние: $x = 2,23$ см (так как время движения больше, чем в предыдущем случае), чему соответствует давление $p = 1,9$ кг/см²; сопротивление воздушного давления достаточно, чтобы изменить направление скорости движения бойка, но вследствие малой скорости в обратном направлении, а также наступления вакуума при $\varphi = 60^\circ$, в кривой, изображающей движение бойка, имеем незначительное опускание вниз (седловина).

Малые колебания величин x , p , v_6 , ω , соответствующих концу четвертого и пятого оборотов кривошипа (табл. V) свидетельствуют, что установившийся режим начинается с пятого оборота, через 0,375 секунды после включения механизма в работу. Период T установившегося движения соответствует одному обороту вала кривошипа, что также подтверждается контрольным расчетом за шестой оборот. Расхождение же основных величин целиком находится в пределах точности расчета.

Остановимся несколько подробнее на рассмотрении установившегося движения механизма за период его работы.

На рис. 7 представлены в функции угла φ поворота кривошипа путь поршня s и бойка x . Разность $x - s = u$ дает относительное расстояние между бойком и поршнем. $x_{max} = 7,82$ см соответствует $\varphi = 285^\circ$; при $u = 0 = x - s$ воздух находится в начальном состоянии: $p = p_0 \approx 1$ кг/см².

$u > 0$ соответствует сжатию воздуха в рабочей части цилиндра; здесь боек отдает энергию через воздушную подушку кривошипно-шатунному механизму и мотору.



СКОРОСТИ ВАЛА КРИВОШИПА

Рис. 6

$u < 0$ соответствует вакууму; здесь боек получает энергию через воздушную подушку от мотора.

На рис. 8 изображены скорость поршня v , скорость бойка v_b , угловая скорость кривошипа ω и давление воздуха p в рабочей части цилиндра за один период. Разность $v_b - v_n = u$ дает скорость относительного движения между поршнем и бойком. $u = 0$, т. е. $v_b = v_n$ соответствует экстремальным значениям давления, что является хорошим контролем вычислений в процессе выполнения работы (на графике показаны 4 точки). В частности, наибольшее сжатие $p_{max} = 9,6 \text{ кг/см}^2$, при $v_b = v_n = -224,3 \text{ см/сек}$, при $\varphi = 290^\circ$.

Кривую давлений воздуха кроме того можно представить в функции:

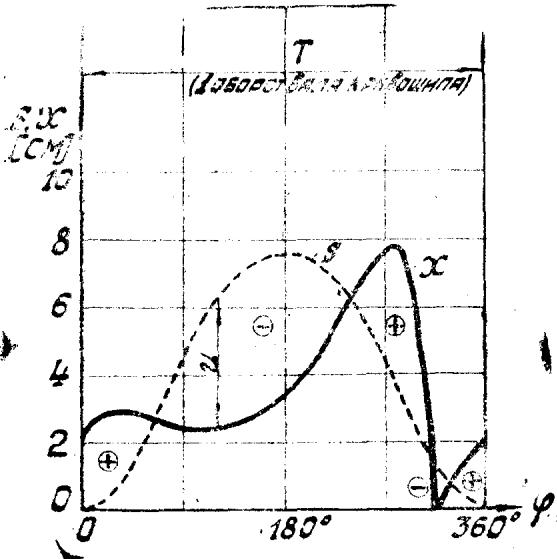


Рис. 7

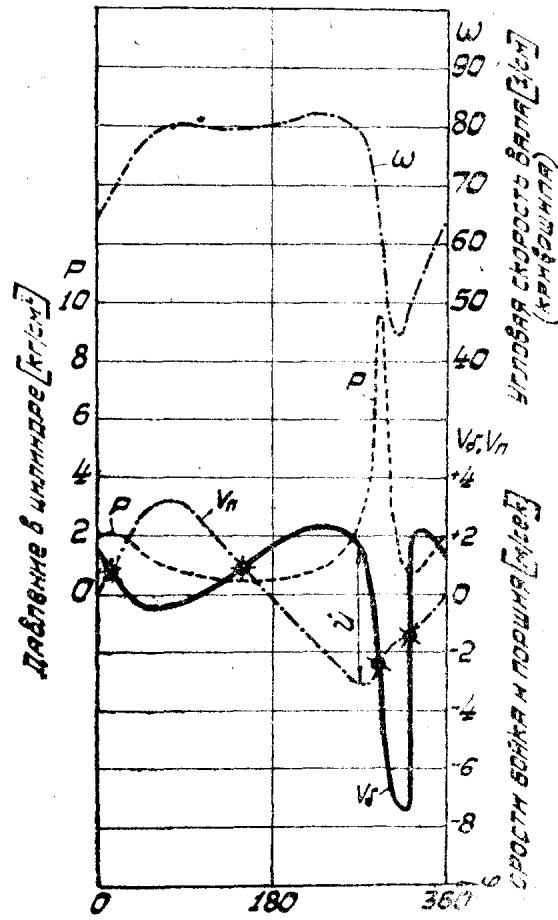


Рис. 8

- 1) $p = f(x)$ — индикаторная диаграмма по ходу бойка (дает воздействие воздуха на боек);
- 2) $p = f(s)$ — индикаторная диаграмма по ходу поршня;
- 3) $p = f(u)$ — график политропы.

Эти кривые позволяют выделить ту часть энергии бойка, которую он получает за счет расширения воздуха между поршнем и бойком.

Если бы связь между бойком и поршнем была жесткая и боек мог бы отделиться от поршня при максимальной его скорости (что соответствует $\varphi \approx 75^\circ$, при смене знака ускорения поршня $W_n = 0$)

$\max v_n = 3,16 \text{ м/сек}$, боек имел бы энергию $E = \frac{1}{2} \frac{Q_b}{g} \cdot \max v_n^2 = 0,59 \text{ кгм}$.

В нашем случае скорость бойка $\max v_{уд} = 7,5 \text{ м/сек}$, следовательно, энергия удара на бойке $E_1 = \frac{1}{2} \frac{Q_b}{g} \cdot v_{бmax}^2 = 3,33 \text{ кгм}$.

Сопоставление величин $\frac{E_1}{E} = \left(\frac{\max v_{удар}}{\max v_n} \right)^2 = \left(\frac{7,50}{3,16} \right)^2 = 5,65$ показывает,

что можно „выжать“ из мотора, введя воздух в качестве упругой связи между поршнем и бойком. Подавляющую часть энергии удара боек накапливает за счет работы расширения сжатого воздуха.

Но такое „черпание“ энергии от мотора весьма существенно сказывается на графике угловой скорости ω , на общей неравномерности движения (коэффициент неравномерности $\approx 0,6$).

На рис. 9 изображены графики ускорений бойка и поршня. Сила, действующая на боек,—это давление воздуха, поэтому кривая ускорений бойка—это кривая давлений воздуха в соответствующем масштабе.

Кривая ускорений поршня связана с изменением скорости последнего, а так как

$$v_n = r \cdot \omega \cdot \left(\sin\varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi \right),$$

то ускорение

$$W_n = \frac{dv_n}{dt} = r\omega^2 (\cos\varphi + \lambda \cos 2\varphi) + r\epsilon \left(\sin\varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi \right).$$

Кроме того, можно удовлетвориться средними значениями ускорения, определяемого формулой $W_n = \frac{\Delta v_n}{\Delta t}$.

На рис. 10 представлены: кинетическая энергия механизма $E = J \frac{\omega^2}{2}$, движущий момент M_q , обусловленный характеристикой мотора, и мо-

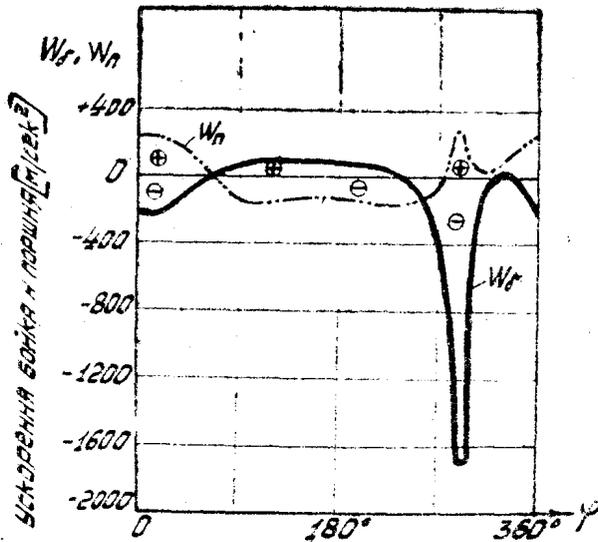


Рис. 9

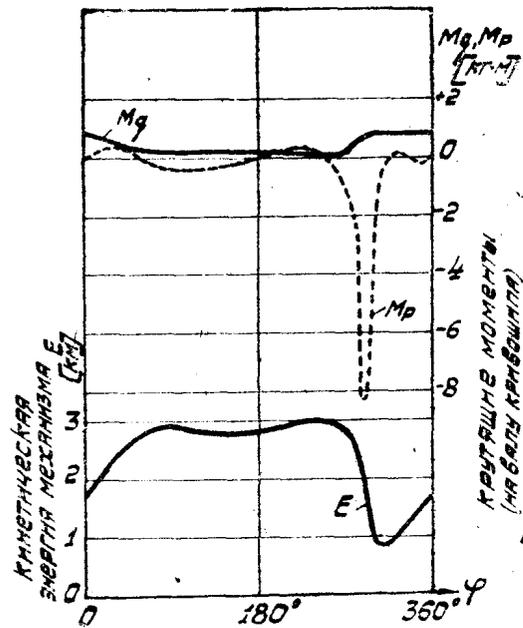


Рис. 10

мент сил воздушного давления M_p в функции угла φ поворота кривошипа. Момент воздушного давления M_p велик не только потому, что велики давления в цилиндре, но и потому, что эти большие давления совпадают с максимальными значениями множителя $\left(\sin\varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi \right)$.

В молотке, если сместить наибольшие давления по φ к концу оборота, то получим меньшие значения для M_p , а следовательно, и меньшие потери в кинетической энергии E .

Определяем отдачу молотка как движение корпуса молотка под действием всех приложенных к нему сил. Так как внешние силы не заданы (сила давления рабочего, сила сопротивления грунта при проходке), выясним отдачу молотка при горизонтальном положении его под действием только внутренних сил: 1) избыточной силы давления воздуха в цилиндре и 2) силы инерции кривошипно-шатунного механизма. На рис. 11 показаны отдельно эти силы, а также скорость корпуса и его перемещение в предположении, что $(v_m)_0 = 0$ и $(y_m)_0 = 0$.

Как видно из графика, за один оборот кривошипа, т. е. за время $\Delta t = 0,08875$ сек, скорость корпуса молотка получит значение $\max v_m = -86,6$ см/сек и перемещение за то же время $y_m = -2,21$ см.

При наличии дополнительной (результатирующей) внешней силы R , действующей на корпус по направлению от рукоятки к пику и равной его весу, $R = Q_m = 13$ кг, через один оборот кривошипа скорость корпуса молотка $v_m = +0,4$ см/сек и его перемещение $y_m = +1,64$ см, считая от начального положения по направлению действия дополнительной силы.

Как видно из графиков и расчета, мы имеем здесь механизм с пониженной отдачей, что объясняется сравнительно большим весом молотка, а также наличием разрежения в цилиндре, кратковременностью повышенного давления и полным использованием энергии сжатого воздуха при сообщении скорости бойку.

Роль начальных данных в рабочем процессе молотка ОЭМ-1

Получить желаемый рабочий процесс при любых значениях заданных параметров, конечно, нельзя. Только при удачном сочетании и подборе их можно „выжать“ из конструкции все возможное, сообразно с предъявленными к ней требованиями.

1. Поскольку желательно получить главную часть энергии удара на бойке за счет работы воздуха, то особенно тщательно должны быть выбраны значения величин r , l_0 , d , α . Величины r и l_0 совместно обуславливают степени разрежения и сжатия, а также положение ударной точки (φ ударное), которую вообще желательно иметь около 360° . При очень малых значениях l_0 , после отскока бойка при встречном движении с поршнем, развиваются большие давления, „останавливающие“ мотор; при больших значениях l_0 в сравнении с r может вообще отсутствовать движение бойка, если $v_0 = 0$ и учесть силы трения, при наличии же начальной скорости у бойка (например, от толчка) может быть явление пропуска удара вследствие проворачивания кривошипа.

От размера диаметра d зависит величина силы давления $P = pB$, действующей на боек и корпус молотка, а также общий вес механизма.

Очень сильное влияние на характер рабочего процесса оказывает принятое значение показателя политропы α . (В нашем расчете значение $\alpha = 1,32$ взято на основании предыдущих работ, выполненных на заводе).

2. В рабочем процессе молотка весьма существенную роль играет мотор и его характеристика.

В нашем примере мотор сравнительно большее время работает на „неустойчивой“ части характеристики (приблизительно $1/6$ часть оборота кривошипа или $1/4$ по времени периода), что должно вести к значительным потерям на нагревание. Иногда мотор работает как динамо, вследствие вакуума, имея угловую скорость большую синхронной. При неизменных

остальных данных необходим мотор специальной конструкции с более жесткой характеристикой.

Начальная угловая скорость ω_0 равна приблизительно синхронной угловой скорости, так как в механизме существует конструктивное приспособление в виде пружинного фиксатора, рис. 2, благодаря которому переход с холостого хода на рабочий осуществляется нажатием корпуса молотка на пик. Назначением этого устройства является устранение возможности встречи (соприкосновения) бойка с ползуном в начальный момент при любом рабочем положении механизма. В нашем расчете $\omega_0 = \omega_{\text{синх}} = \frac{\pi \cdot n}{30} \cdot i = 82,5 \text{ 1/сек}$ на валу кривошипа. Если взять скорость холостого хода $\omega_0 = 76 \text{ 1/сек}$ (при той же характеристике), то, как показал расчет,

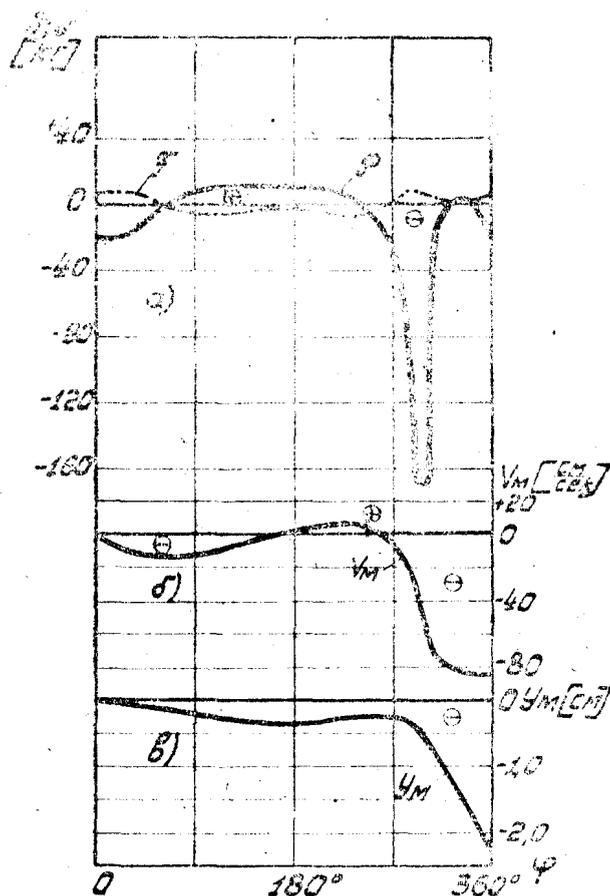


Рис. 11

механизм уже при $\varphi = 90^\circ$ переходит на то же значение угловой скорости, если движение начнется и с $\omega_0 = 82,5 \text{ 1/сек}$.

3. В молотке ОЭМ-1 при нажатии на пик включение на рабочий ход может быть произведено при различных значениях угла φ , что соответствует переменному значению длины воздушной подушки в пределах от l_0 до $l_0 + 2r$, а следовательно, и различным начальным режимам работы.

Для неподвижной установки механизма и при отсутствии толчков со стороны хвостовика пики начальная скорость бойка $v_0 = 0$; при нажатии корпус молотка, сближаясь с пикой, освобождает боек от фиксатора. Боек при этом неполностью перекрывает отверстия в гильзе между внутренней рабочей частью цилиндра и наружной, помещенной, во избежание засорения пылью, в кожухе механизма (ширина оставшихся

отверстий $\approx 1,5$ мм). Здесь, при включении в интервале от 180° до 360° , воздух из гильзы будет выталкиваться поршнем через неприкрытые отверстия в пространство, окружающее гильзу и мотор; при дальнейшем движении поршня влево в цилиндре создается разрежение, и избыточным давлением атмосферного воздуха боек будет двигаться влево. Рис. 12 дает общую картину рабочего процесса при $\varphi_0 = 90^\circ$ („неполноценный удар“); остальные возможные случаи включения в интервале от $\varphi_0 = 0$ до $\varphi_0 = 90^\circ$ будут размещаться между этими предельными случаями. При углах, близких к 180° , разрежение в цилиндре недостаточно для того, чтобы сообщить движение бойку (особенно при наличии силы трения).

В момент удара о пик (при неподвижном корпусе молотка) боек получает начальную скорость, величина которой зависит от величины сообщенного импульса. Начальный рабочий ход возможен при любом φ , следовательно, в ОЭМ-1 имеется множество возможных начальных включений бойка, но при наличии отверстий в гильзе, а также и отскока бойка, механизм очень быстро находит свое нормальное рабочее состояние. Специально проведенные испытания опытного образца только на включение показали во всех случаях устойчивую работу молотка (на слух — примерно с одинаковой силой удара) без каких-либо перебоев; очевидно, наиболее вероятным начальным углом включения является угол φ_0 между 0° и 90° . Вопрос о переходных режимах, в связи с включением бойка при любых углах φ и начальных скоростях бойка v_0 , нуждается еще в специальном исследовании.

4. Положение механизма влияет на характер рабочего процесса: при вертикальном или наклонном положении молотка необходимо в уравнении (1) учесть силу тяжести бойка, но, как показали расчет и опытные испытания, влияние положения механизма на характер рабочего процесса молотка не велико и имеет значение, главным образом, для начального момента.

5. Большое влияние на характер рабочего процесса и продолжительность

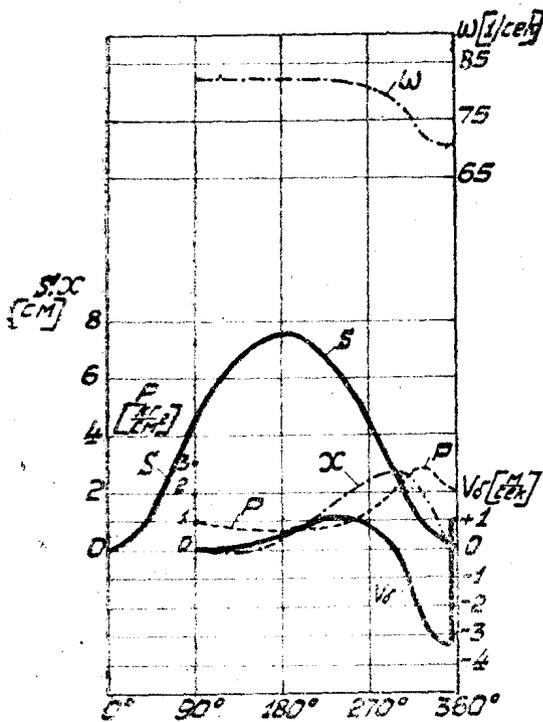


Рис. 12

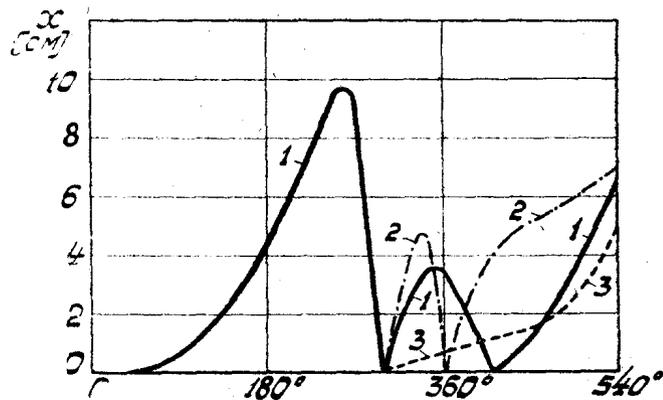


Рис. 13

переходного режима имеет значение коэффициента восстановления β . В нашем расчете принято, что энергия отскока бойка $= 10\%$ от ударной; следовательно, $\beta = \sqrt{0,1} = 0,316$. Соответствующая кривая $x = f(\varphi)$ на рис. 13 после первого удара (от $\varphi = 302,5^\circ$ до $\varphi = 180^\circ$ следующего оборота обозначена цифрой 1. Здесь же изображен путь бойка после удара по

стали для $\beta = 5/9$ (кривая 2 на рис. 13). В этом случае при сопровождающем ударе развиваются большие давления, чем в первом случае, и после второго отскока боек, имея значительную скорость, подгоняет поршень, отдавая ему энергию. Вследствие небольшого значения $u = x - s$ должны быть меньше степени сжатия, а следовательно, уменьшится и ударная скорость бояка.

Если удар неупругий, т. е. $\beta = 0$, боек отдает всю энергию; сопровождающий удар отсутствует. Соответствующая этому случаю кривая изображена цифрой 3.

§ 5. Заключение

Путем предварительного теоретического исследования и расчета можно получить графики рабочего процесса спроектированного молотка и, изучая их, устранить замеченные недостатки до изготовления опытного образца. При численном интегрировании описанными методами можно сделать расчет с учетом сил сопротивления, положения молотка, движения его корпуса, нагрева, истечения воздуха. Можно применить „комбинированный“ метод к изучению работы других механизмов, а также путем сравнения можно изучить работу данного двигателя при различного рода нагрузках.

В применении же к электропневматическим молоткам необходимо в дальнейших работах изучить и определить более тщательно такие величины, как показатель политропы, силы трения, момент сил сопротивления, коэффициент восстановления, силы сопротивления при проходке молотка, нагрев, утечки воздуха и т. д.

Необходимо выработать более строгую методику лабораторных испытаний с установлением соответствующих показателей и нормативов (в настоящее время почти каждым изобретателем предлагается своя методика). В части теоретического исследования следует попытаться найти общее решение совместных уравнений (1) и (2), а также выяснить роль начальных условий в общем случае. Если общего решения не будет получено или оно явится очень сложным, то необходимо, с известной степенью точности, учтя лабораторные испытания опытных образцов, вычислить ряд таблиц, построить номограммы, по которым уже сравнительно просто можно будет произвести расчет. Имея же ряд точных расчетов, в дальнейшем на основании теории подобия можно произвести (без большого вычислительного труда) серию расчетов для динамически подобных механизмов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ И ПОСОБИЙ

1. Безикович Н. и Фридман А.—Приближенные вычисления. Госиздат, Ленинград, 1925.
2. Проф. Ветчинкин В. П.—Руководство по приближенным вычислениям. Издание ЦАГИ. Москва, 1935.
3. Проф. Ветчинкин В. П.—Методы приближенного и численного интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений (выпуск III). Издание Военно-Воздушной Академии РККА, Москва, 1935.
4. Гейлер, Л. Б.—Формула для крутящего момента асинхронного двигателя. Вестник электропрора ш. ности. 19 8, № 12.
5. Гичаренко В. А.—Отбойные молотки и их применение при механизации угледобычи на крутопадающих пластах. Издание Союзуголь, 1930.
6. Доброгоурский О.—Вопросы теории удара. АН СССР, Ин-т машиноведения. Москва—Ленинград, 1942.
7. Проф. Кетов Х. Ф., доц. Алабужев П. М., асс. Шленкина, Н. Г.—Исследование динамики и рабочего процесса без едукторного электропневматического молотка. Отчет о работе, выполненной по договору с ТЭМЗ, 1942 (рукопись).
8. Проф. Кетов Х. Ф. и проф. Колчин П. И.—Теория механизмов и машин. Машгиз. Москва—Ленинград, 19 9.
9. Крылов А. Н.—Лекции о приближенных вычислениях. АН СССР, Ленинград, 1933.

10. Кучеров П. С.—К вопросу об исследовании пневматических отбойных молотков. Уголь, 1933, № 93.
11. Малеев Г. И.—Электропневматический молоток. Горное машиностроение, 1939, № 4—5.
12. Проф. Маркович— Исследование пневматического приводного молота типа Беше и Гросс. Изд. Москва, 1932.
13. Мелентьев П. В.—Несколько новых методов и приемов приближенных вычислений. ОНТИ, Москва—Ленинград, 1937.
14. Москвитин А. И.—Электропневматический или соленоидный молоток. Электричество, 1934, № 5—6.
15. Москвитин А. И.—Проблема электроотбойного молотка. История техники, вып. II, ОНТИ, 1934, стр. 161—182.
16. Покровский Н. М.—Конструирование молотков новой конструкции. Горный журнал, 1933, № 1.
17. Проф. Николаи Е. Л.—Лекции по теоретической механике, ч. II. ОНТИ, Москва—Ленинград, 1934.
18. Скарборо Д. С.—Численные методы математического анализа, ГТТИ, Москва—Ленинград, 1934.
19. Суднишников Б. В.—Некоторые вопросы теории ударных машин. Диссертация защищена в ТИИ в 1944 году.
20. Суднишников Б. В. Элементарное графическое решение некоторых динамических задач. Вестник инженеров и техников, 1940, № 2.
21. Акад. Терпигоров А. М., доц. Демидов П. Н., доц. Протодьяконов М. М и др. Горные машины для выемки полезных ископаемых (глава „Отбойные молотки“, стр. 482—509), Москва, 1940.
22. Тимошенко С. П.—Теория колебаний в инженерном деле. ГНТИ, Москва—Ленинград, 1931.
23. Унсков Е. П.—Теоретический расчет пружинного молота с плоской рессорой (из работ ЦНИИМАШ), Вестник металлпромышленности, 1936, № 7.
24. Филиппов М. Ф.—Об уравнении характеристики для трехфазного асинхронного двигателя. Известия ТИИ, т. 59, II, 1941.
25. Шмаргунов К. Н.—Электрические отбойные молотки. Конструкции, расчеты и испытания. Москва—Свердловск, 1937.

