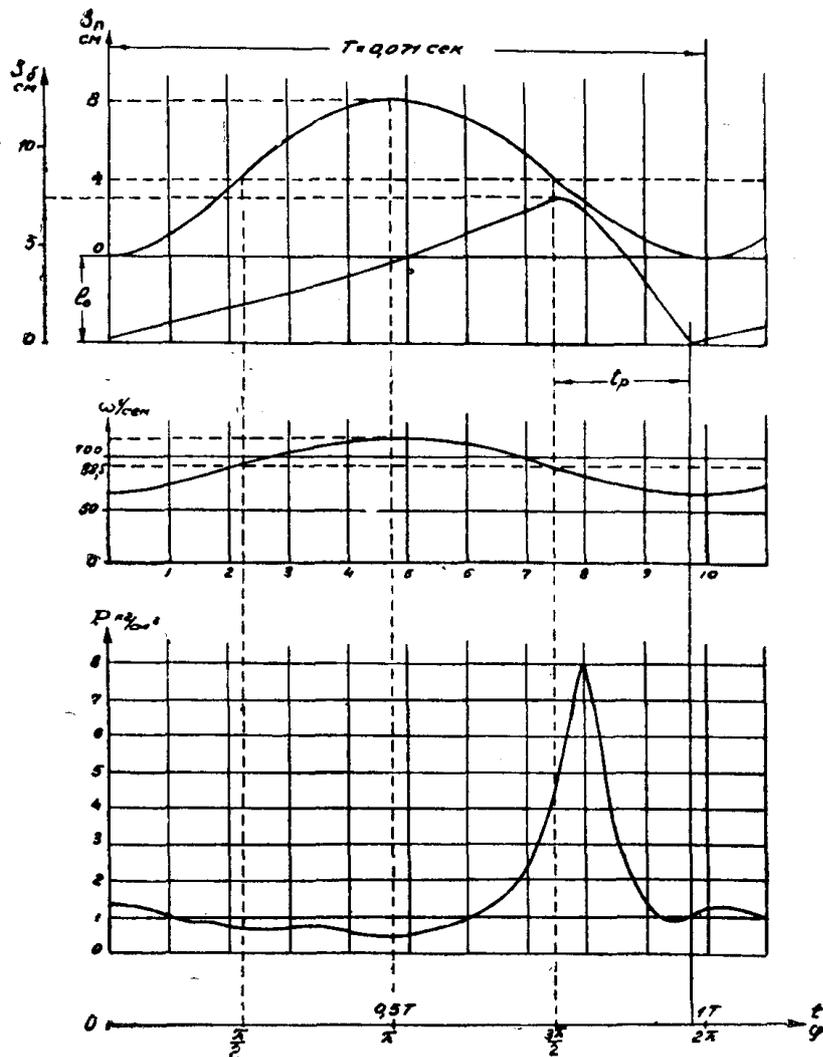


римента излагается в работе П. М. Алабужева и О. Д. Алимова [2]. Кроме указанных кривых, одновременно на катодном осциллографе наблюдались и регистрировались кривые давления воздуха P и угловой скорости ω , а также отметка угла поворота вала кривошипа.

Экспериментальные кривые для одного из режимов представлены на фиг. 2. Нужно отметить, что при обработке диаграмм, при совмещении кривых на один график, в ряде случаев возникают затруднения и некоторые неувязки с исходными данными при проведении эксперимента. В од-



Фиг. 2

ном из опытов была утрачена тарировочная кривая емкостного датчика давления; возник вопрос — каким образом протарировать записанную кривую давления P^1), имея графики пути бойка s_b , пути поршня s_n , а также значение веса бойка Q_b и период цикла T ?

Вначале покажем, как с известным приближением можно проверить справедливость тарировки графика давления. После совмещения кривых на один график, при обработке опытных результатов, необходимо разделить период цикла прямой AA на две части, соответствующие холостому ходу бойка в течение времени t_x и рабочему ходу за время t_p , завершающемуся ударом по инструменту. Положение вертикали AA можно

1) При условии линейности тарировки графика давления.

достаточно точно провести через точку, соответствующую максимальному ходу бойка (т. е. когда $v_b = 0$). Зная масштаб кривой пути бойка — l_c и масштаб времени — t_c , по формуле:

$$v = \frac{l_c}{t_c} \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

можем найти скорость в любой момент времени (здесь α — угол наклона касательной к графику s_b в соответствующей точке).

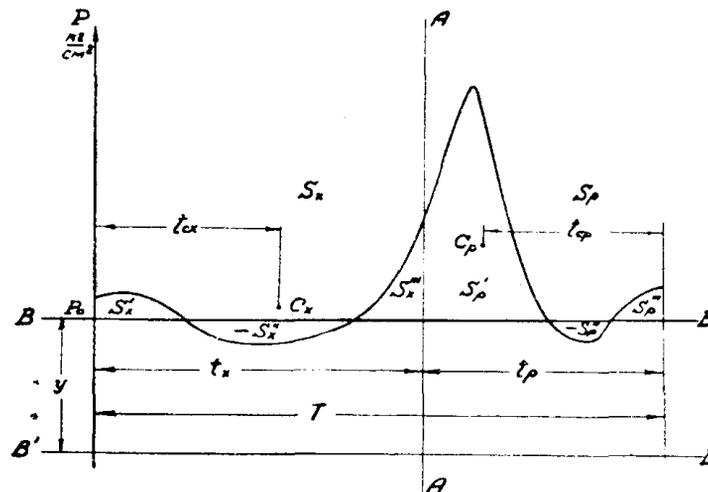
Определяем скорость бойка в момент удара — $v_{уд}$ и при отскоке — $v_{от}$. Отношение скорости отражения — $v_{от}$ к скорости в момент удара $v_{уд}$ (являющейся начальной скоростью) называется коэффициентом восстановления при ударе; очевидно, что это соотношение:

$$k = \frac{v_{от}}{v_{уд}} \quad (1)$$

является в данном случае характеристикой системы: „Боек—инструмент—материал“.

Кроме того, скорость бойка в любой момент времени, а также среднее давление за любую часть цикла T можно определить на основании теоремы импульсов [3].

Проводим прямую BB параллельно нулевой линии давления $P = 0$, соответствующую избыточному давлению воздуха в цилиндре молотка над атмосферным, которое приближенно полагаем равным: $P_0 = 1 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$.



Фиг. 3

Тогда, как это видно из фиг. 3, площадь импульса воздушного давления разбивается прямыми AA и BB на ряд элементов, число которых зависит от режима работы машины, ее параметров и взаимодействия, с поглощающей энергию средой при ударе.

Площадь импульса, лежащая слева от прямой AA , соответствует холодному ходу бойка; обозначим ее через S_x (из фиг. 3 очевидно:

$$S_x = S'_x - S''_x + S'''_x).$$

Площадь импульса сил, расположенную справа от прямой AA , соответствующую рабочему ходу бойка, обозначим через S_p (из фиг. 4 видно: $S_p = S'_p - S''_p + S'''_p$). C_x и C_p — центры тяжести площадей импульсов S_x и S_p .

Согласно теореме импульсов:

$$m v - (-m v_{om}) = S_t, \quad (2)$$

здесь $m = \frac{Q_b}{g}$;

следовательно, скорость бойка v в любой момент времени t может быть определена из соотношения (2), по формуле

$$v = -v_{om} + \frac{S_t}{m}. \quad (2a)$$

В конце холостого хода, т. е. при $t = t_x$, $v_b = 0$, следовательно,

$$v_{om} = \frac{S_x}{m}.$$

В момент удара, при $t = t_x + t_p = T$

$$\begin{aligned} v_{y\partial} &= -v_{om} + \frac{S_T}{m} = -v_{om} + \frac{S_x + S_p}{m} = \\ &= -v_{om} + \frac{S_x}{m} + \frac{S_p}{m} = \frac{S_p}{m}. \end{aligned}$$

Таким образом, скорость бойка в момент удара равна отношению импульса силы, действующей на боек за рабочую часть времени хода t_p , к массе бойка.

Найдем средние значения сил давления воздуха за время t_x , t_p и T , обозначив их соответственно P_x , P_p , P_T .

$$\left. \begin{aligned} S_x &= m v_{om} = \frac{Q_b}{g} \cdot v_{om} = P_x \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot t_x, \quad \text{откуда } P_x = \frac{q \cdot v_{om}}{g \cdot t_x}, \\ S_p &= m v_{y\partial} = \frac{Q_b}{g} \cdot v_{y\partial} = P_p \cdot \frac{\pi D^2}{4} t_p \quad \text{„} \quad P_p = \frac{q \cdot v_{y\partial}}{g \cdot t_p}, \\ S_T &= S_x + S_p = \frac{Q_b}{g} (v_{om} + v_{y\partial}) = P_T \frac{\pi D^2}{4} \cdot T \quad \text{„} \quad P_T = \frac{q(v_{om} + v_{y\partial})}{g T} \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

здесь $q = \frac{Q_b}{\frac{\pi D^2}{4}}$ — вес бойка на единицу площади, а D — диаметр цилиндра (или бойка).

Значение среднего давления воздуха, действующего на боек, можно увязать с параметрами молотка и режимом его работы:

$$P_T = \frac{q(v_{om} + v_{y\partial})}{g T} = \frac{q \cdot Z(1+k)v_{y\partial}}{60 \cdot g} = \frac{Q_b \cdot Z(1+k) \cdot v_{y\partial}}{15 \pi D^2 g},$$

т. е. среднее давление за цикл работы молотка пропорционально весу бойка Q_b , числу ударов в минуту Z , скорости удара v_b , обратно пропорционально квадрату диаметра цилиндра D и зависит от коэффициента восстановления при ударе k .

Для определенного типа конструкции, на основании экспериментальных данных, при различных условиях работы, можно найти связь между

максимальным давлением воздуха P_{max} и средним давлением P_1 за период $T = \frac{60}{Z}$, т. е. определить зависимость: $P_{max} = f(P_T)$, а также наиболее вероятное значение соотношения $\frac{t_p}{t_x}$, и таким образом теоретически построить индикаторную диаграмму (аналогично можно было бы выразить P_{max} через P_x и P_p). Зная максимальное давление P_{max} на основании уравнения состояния газа: $Pv = RT^\circ$ или известного соотношения $\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{m-1}{m}} = \left(\frac{T_2^\circ}{T_1^\circ}\right)$, можно в первом приближении определить максимальную температуру воздуха в цилиндре молотка T° и тем самым знать температуру нагара смазки и степень нагретости молотка.

Между импульсами сил S_x , S_p и S_T на основании (3) можно составить следующие соотношения:

$$\left. \begin{aligned} \frac{S_x}{S_p} &= \frac{m v_{om}}{m v_{y\delta}} = \frac{P_x \cdot t_x}{P_p \cdot t_p} = k; & \frac{S_x}{S_T} &= \frac{S_x}{S_x + S_p} = \frac{k}{k+1}; \\ \frac{S_p}{S_T} &= \frac{S_p}{S_x + S_p} = \frac{1}{k+1}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

При неупругом ударе $k=0$, а следовательно, $S_x = S_x' - S_x'' + S_x''' = 0$, при вполне упругом ударе $k=1$, тогда $S_x = S_p$, для стали $k \approx 5/9$, следовательно:

$$\frac{S_x}{S_p} \approx \frac{1}{2}; \quad \frac{S_x}{S_T} \approx \frac{1}{3}; \quad \frac{S_p}{S_T} \approx \frac{2}{3}.$$

Можно показать, что между средними значениями давления воздуха существуют соотношения, выражаемые через коэффициент восстановления k и части времени цикла t_x и t_p ; из (3) следует, что

$$\frac{P_x}{P_p} = k \cdot \frac{t_p}{t_x}; \quad \frac{P_x}{P_T} = \frac{k}{k+1} \cdot \frac{T}{t_x}; \quad \frac{P_p}{P_T} = \frac{1}{k+1} \cdot \frac{T}{t_p}. \quad (5)$$

При наличии качественных кривых пути бойка s_δ и давления воздуха P в цилиндре молотка, полученных из опыта с нанесенными на них масштабными, нетрудно планиметрированием проверить, что площади импульсов S_x и S_p удовлетворяют соотношениям (4), а по формулам (3) определить средние значения давления P_x , P_p , P_T и проверить масштаб тарировки, полученной на основании эксперимента.

В качестве примера рассмотрим графики, представленные для одного из исследуемых режимов на фиг. 2.

В этом режиме

$$\begin{aligned} Q_\delta &= 2,400 \text{ кг}, & D &= 68,0 \text{ мм}, & q &= \frac{Q_\delta}{\frac{\pi D^2}{4}} = 0,066 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}, \\ Z &= 845 \text{ уд/мин.}, & r &= 40,0 \text{ мм}, & l_0 &= 45,0 \text{ мм} \end{aligned}$$

(удар по металлическому стержню, опирающемуся на гранит).

Период цикла $T = \frac{60}{Z} = 0,0710 \text{ сек} = 146 \text{ мм}$ на чертеже (с погрешностью измерения 0,5 мм; погрешность показаний тахометра 1,5%).

Время холостого хода $t_x = 0,0578 \text{ сек} = 119 \text{ мм}$ на чертеже.

Время рабочего хода $t_p = 0,0132 \text{ сек} = 27 \text{ мм}$ на чертеже.

$\frac{t_p}{t_x} = 0,227$; $\frac{t_p}{T} = 0,18$ —коэффициент, характеризующий использование рабочего времени машиной.

Масштаб времени $t_c = \frac{0,071}{146} = 0,000485 \frac{\text{сек}}{\text{мм на чертеже}}$.

Линейный масштаб $l_c = 2,11 \frac{\text{мм}}{\text{мм на чертеже}}$;

угол наклона касательной к кривой s_b в момент удара $\alpha_y = 53^\circ$,
угол наклона касательной к кривой s_b в момент отскока $\alpha_{om} = 13^\circ$.

Скорость в момент удара $v_b = \frac{l_c \cdot \text{tg } 53^\circ}{t_c} = \frac{2,11 \cdot 1,33}{0,000485} = 580 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$.

Скорость в момент отскока $v_{om} = \frac{l_c \cdot \text{tg } 13^\circ}{t_c} = \frac{2,11 \cdot 0,23}{0,000485} = 100 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$.

Коэффициент восстановления при ударе $k = \frac{v_{om}}{v_{yd}} = \frac{1,00}{5,80} = 0,17$.

Энергия удара на бойке $A_b = \frac{Q_b \cdot v_b^2}{2g} = \frac{2,4 \cdot 5,8^2}{2 \cdot 9,8} = 4,12 \text{ кг. м.}$

Энергия отскока $A_{om} = \frac{Q_b \cdot v_{om}^2}{2g} = \frac{2,4 \cdot 1,0^2}{2 \cdot 9,8} = 0,12 \text{ кг. м.}$

Так как энергия отскока бойка не является для машины потеряннй энергией, то мерой передачи энергии инструменту является коэффициент передачи удара

$$\eta_{пер} = \frac{A_{yd} - A_{om}}{A_{yd}} = 1 - k^2 \approx 0,97.$$

Эта характеристика не является значением к.п.д. удара, поскольку ею не учитываются бесполезные потери энергии при ударе; к.п.д. при соударении тел (η_{yd}) зависит от соотношения их масс, а также масс, к ним присоединенных, физических и геометрических свойств соударяемых материалов и их состояния и изменяется в весьма широких пределах (от нуля до единицы).

Найдем импульсы сил давления на единицу площади:

$$\left. \begin{aligned} S_x &= \frac{q}{g} \cdot v_{om} = \frac{0,066}{981} \cdot 100 = 0,00675 \frac{\text{кг}^2 \cdot \text{сек}}{\text{см}^2}; & \frac{S_x}{S_p} &= k = 0,17, \\ S_p &= \frac{q}{g} \cdot v_{yd} = \frac{0,066}{981} \cdot 580 = 0,03915 & \text{ " } & \frac{S_x}{S_T} = \frac{k}{k+1} = 0,15, \\ S_T &= S_x + S_p = 0,04585 & \text{ " } & \frac{S_p}{S_T} = \frac{1}{k+1} = 0,85 \end{aligned} \right\} (4').$$

Измеренные площади единичных импульсов $S_x = 122 \text{ мм}^2$ и $S_p = 710 \text{ мм}^2$ удовлетворяют соотношениям (4'), следовательно:

$$P_x = \frac{S_x}{t_x} = \frac{0,00675}{0,0578} = 0,117 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2} = \frac{122 \text{ мм}^2}{119 \text{ мм}} = 1,05 \text{ мм на чертеже}$$

$$P_p = \frac{S_p}{t_p} = \frac{0,0391}{0,0132} = 2,970 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2} = \frac{710 \text{ мм}^2}{27 \text{ мм}} = 26,1 \text{ мм} \quad "$$

$$P = \frac{S_T}{T} = \frac{0,04585}{0,071} = 0,645 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2} = \frac{832 \text{ мм}^2}{146 \text{ мм}} = 5,7 \text{ мм} \quad "$$

откуда масштаб тарировки:

$$1 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2} = \frac{1,05}{0,117} = \frac{26,1}{2,97} = \frac{5,7}{0,645} = 8,85 \text{ мм} \quad "$$

Согласно масштабу давления и графику, определяем

$$P_{max} = 1,0 + \frac{60,0}{8,85} = 7,8 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}; \quad P_{min} = \frac{4,5}{8,85} = 0,51 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2},$$

$$P_{max} = C \cdot P_T, \text{ откуда } C = \frac{P_{max}}{P_T} = \frac{7,8}{0,645} = 12,5.$$

На основании обработки ряда режимов молотка данного типа при переменных параметрах можно считать среднее значение коэффициента $C \approx 10$ с максимальным уклоном $\pm 25\%$.

Погрешность в определении масштаба тарировки расчетным способом зависит от степени точности исходных данных, а так же и от погрешности, с которой определяются отдельные величины в процессе обработки; в рассмотренном примере погрешности масштаба P_c

$$P_c = \left| 1 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2} \right| = \frac{\frac{S_T \text{ мм}^2}{T_{\text{мм}}}}{\frac{q(1+k) \cdot v_{y\partial}}{T}},$$

погрешность

$$\begin{aligned} |\Delta P_c| &= |\Delta S_T \text{ мм}^2| + |\Delta T_{\text{мм}}| + |\Delta q| + |\Delta v_{y\partial}| + |\Delta v_{om}| + |\Delta T_{\text{сек}}| = \\ &= (2,5 + 0,5 + 0,5 + 2,0 + 2,0 + 1,5) \% = 9\%. \end{aligned}$$

Погрешность измерения давления воздуха P емкостным датчиком путем наблюдения за отклонением луча на экране катодного осциллографа определяется из отношения толщины линии электронного луча Δh в мм к среднему значению отклонения луча от нулевой линии h в мм и ошибки, допускаемой экспериментальным методом исследования.

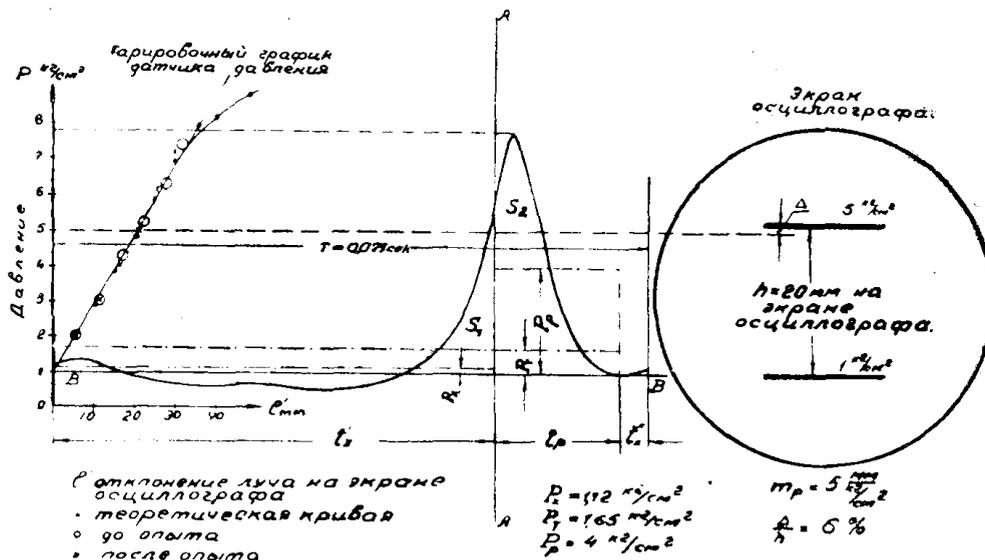
На фиг. 4 изображена кривая давления P , график тарировочной кривой снятый до и после опыта, справа проведены линии на экране осциллографа и соответствующие им давления: нижней линии соответствует давление 1 кг/см^2 , верхней— 5 кг/см^2 .

Расхождение в значении давления, полученного из опыта

$$\text{в данном случае равно } \frac{\Delta}{P_{max}} \cdot 100 = \frac{3,6}{60} \cdot 100 = 6\%.$$

Таким образом, погрешность определения масштаба давления P_c по графику пути сопоставима с погрешностью, получаемой непосредственно при измерении наблюдаемой величины на экране осциллографа (больше ее в $1,5 \div 2$ раза).

Из рассмотренного примера видно, как можно, при наличии графика движения пути бойка S_b , тарировать записанную экспериментально кривую давления воздуха P ; это важно не только в тех случаях, когда, например, утрачен тарировочный график или по каким-то причинам во время работы произошло смещение нулевой линии или случайно



Фиг. 4

произошло изменение масштаба измеряемой величины P (например, повернули ручку осциллографа!). Имея записанной на фото только форму кривой давления P , можно эту кривую в дальнейшем обработать указанным выше способом. Особо важное значение этот метод тарировки приобретает при исследовании явления удара между бойком и инструментом.

Порядок выполнения работы

1. Совмещаем кривые S_b и P на один график в одном и том же масштабе времени; затем проводим наиболее вероятные значения координатных осей AA и BB (причем положение вертикали AA можно провести достаточно точно по S_{bmax}); определяем $k = \frac{v_{от}}{v_{уд}}$.

2. Планиметрируя площади импульсов S_x и S_p путем двух, трех проб, проверяем справедливость соотношения (1), т. е. $k = \frac{S_x}{S_p}$ и устанавливаем окончательное положение линии BB , которую можно в дальнейшем принять в качестве „нулевой“ линии отсчета, т. е. с учетом противодействия воздуха с другой стороны бойка; в большинстве случаев, в пределах погрешности опыта (т.е. $8-9\%$) такое построение является достаточным.

Положение линии BB можно найти за два приема:

1) задаваясь положением произвольной линии B_1B_1 и определяя планиметрированием значение площадей S'_x и S'_p ;

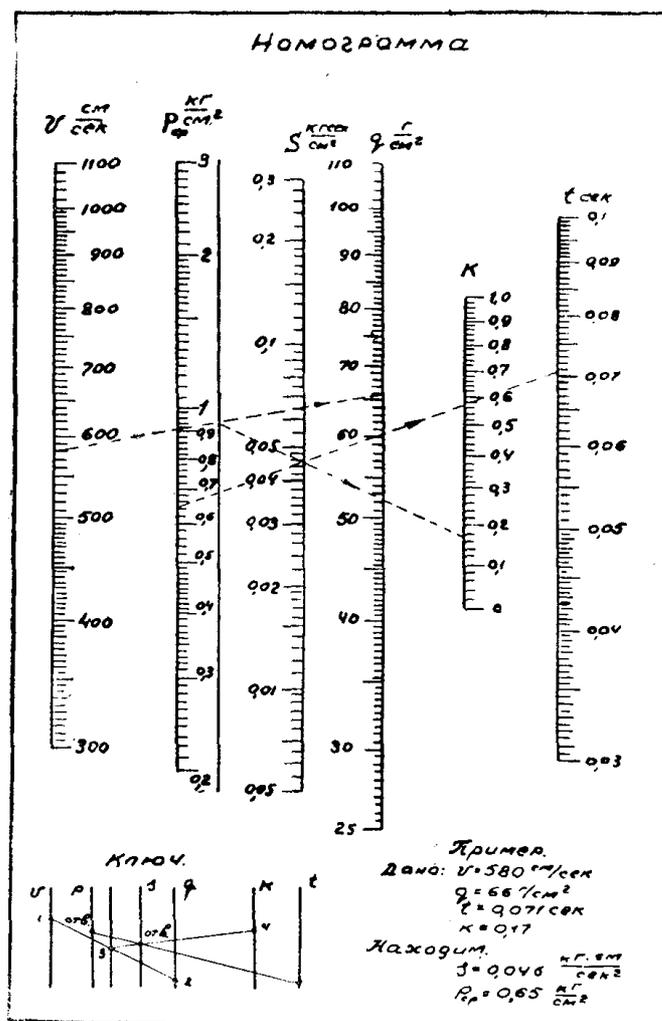
2) затем находим расстояние „у“ из соотношения:

$$\frac{S_x}{S_p} = \frac{S'_x - y t_x}{S'_p - y t_p} = k$$

и устанавливаем окончательное положение линии BB , а также значения площадей импульсов S_x и S_p (фиг. 3).

3. На основании соотношений (3) определяем средние значения давления P_x , P_p , P_m и масштаб тарировки P_c , а следовательно, и P_{max} и P_{min} .

Вычисления упрощаются применением номограммы (фиг. 5). При наличии протарированной кривой давления $P=f(t)$, таким приемом, с известным приближением может быть оценена погрешность тарировки датчика и, следовательно, осуществлен контроль. Здесь уместно отметить,



Фиг. 5

что кривая давления может быть воспроизведена по графику движения бойка S_b — путем двукратного графического дифференцирования, т. е. нахождения кривой ускорения, см. [1], вычисления по ней и известному значению единичного веса бойка q , величины давления p . По нашим поверочным расчетам погрешность и здесь порядка 9—10% (наибольшая погрешность на „пике“ давления P_{max}), но количество вычислительной работы этим методом увеличивается во много раз.

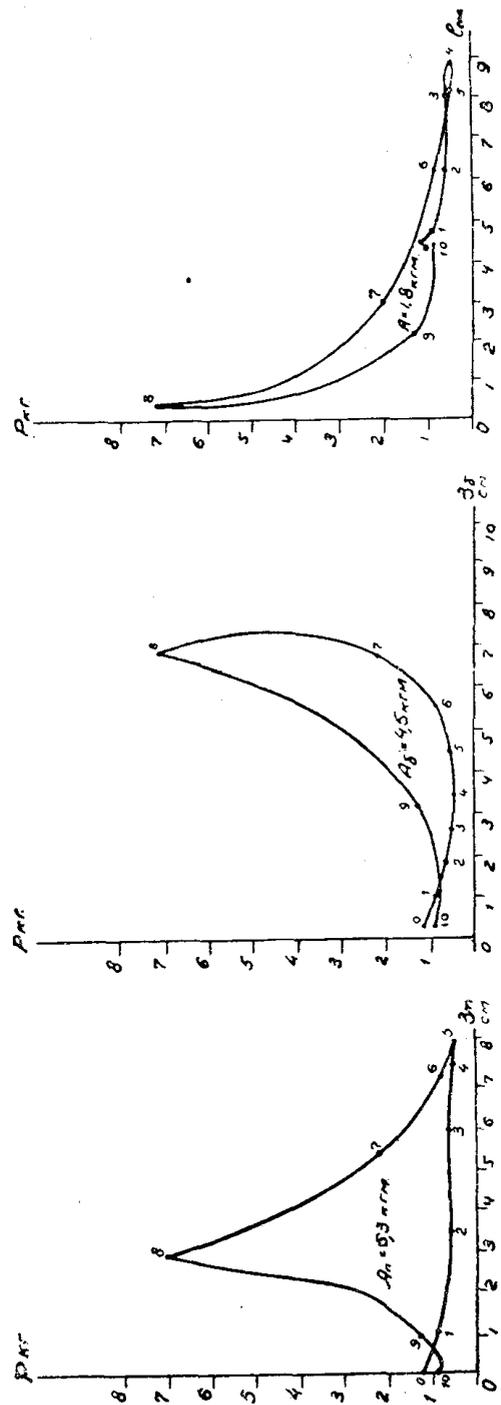
4. Имея кривые s_b и s_n , а также выражение $P=f(t)$, нетрудно построить индикаторные диаграммы:

а) по ходу поршня — $P=f_1(s_n)$;

б) по ходу бойка — $P=f_2(s_b)$;

в) по изменению объема воздушной подушки — $P=f_3(l)$.

Указанные диаграммы представлены на фиг. 6, они показывают воздействие воздушной связи на поршень A_n , боек A_b и дают величину ком-



Фиг. 6

прессорных потерь (к.п.д. воздушной связи порядка $\approx 71\%$), из последней диаграммы можно в первом приближении определить средние значения показателей политропы: сжатия $m_{сж} = 1,05$, расширения $m_{расш} = 0,92$.

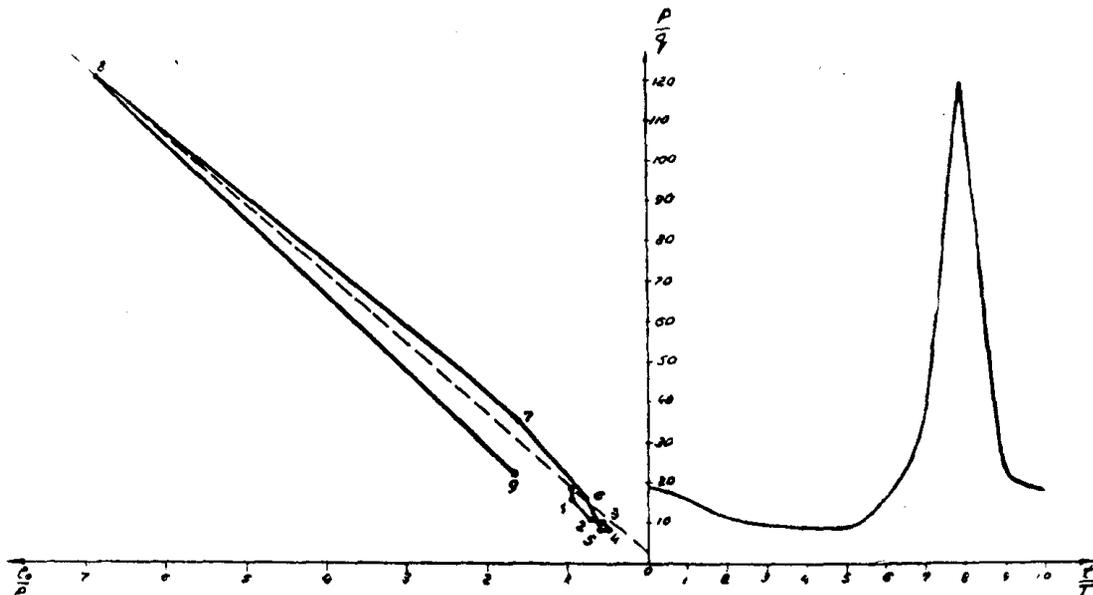
Из фиг. 6 видно, что кривые не являются замкнутыми, следовательно, протекание процесса в воздушной связи, строго говоря, не является политропическим, так как весовое количество воздуха между бойком и поршнем не постоянно, из-за имеющихся утечек газа через компенсационные отверстия и неплотности между цилиндром и бойком, а также между цилиндром и поршнем.

5. Зная к. п. д. машины η и коэффициент использования ее времени $\eta_{вр} = \frac{t_p}{T}$, согласно литературным данным по исследованию кузнечных молотов [6; 23] определяем коэффициент мощности $R = \eta \cdot \frac{t_p}{T}$; этот коэффициент характеризует эффективность работы машины. В нашем примере $\frac{t_p}{T} = 0,18$ (близко к значению $k = \frac{v_{от}}{v_{уд}} = 0,17$).

Потребляемая мощность электрического тока = 2,53 квт и к.п.д. = $\eta = \frac{A_6 \cdot z / 60 \cdot 9,8}{N} = 0,22$, следовательно:

$$R = \eta \cdot \frac{t_p}{T} = 0,22 \cdot 0,18 = 0,04 = 4\%.$$

6. Изменение ряда величин за период цикла представлено в безразмерных координатах на фиг. 7. Изучение семейства подобных кривых даст возможность определить границы наиболее вероятных значений изменения интересующих нас величин за доли цикла.



Фиг. 7

Указанные соотношения справедливы для электропневматических молотков со свободным движением бойка, как для случая односторонней, так и двухсторонней воздушной связи, справедливы они и для пневматических молотков. Две прямые AA и BB являются основными координатными осями для силовой диаграммы.

В том случае, когда имеется только одна кривая изменения давления (или силы) в функции времени, а также известно значение коэффициента восстановления $k = \frac{v_{от}}{v_{уд}}$, — положение осей AA и BB можно определить на основании двух соотношений:

$$S_x = k \cdot S_p, \quad (4)$$

$$и \quad S_x \cdot tc_x = S_p \cdot tc_p = m \cdot S_{бmax}, \quad (6)$$

здесь tc_x и tc_p — расстояния центров тяжести площадей импульсов (см. фиг. 3) от начала и конца цикла.

Соотношение (6) является следствием теоремы о перемещении массы за время действия силы, доказанной Б. В. Суднишниковым [4] и примененной автором, совместно с Н. Н. Есиным, к исследованию пневматических молотков [5]. На основании соотношения (6) имеется возможность по заданному графически импульсу силы непосредственно вычислить максимальный ход бойка $S_{бmax}$, а также и сближение соударяющихся тел за время удара.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алабужев П. М. и Юдин И. П. Экспериментальное исследование электропневматического молотка. Труды горно-геолог. ин-та, вып. 8, ЗСФАН СССР, Новосибирск, 1950.
2. Алабужев П. М. и Алимов О. Д. К методике определения энергии удара на бойке. Печатается в настоящем томе Известий ТПИ.
3. Лойцянский Л. Г. и Лурье А. И. Курс теоретической механики, ч. II, Гостехиздат, Москва, 1948.
4. Суднишников Б. В. Теорема о перемещении массы за время действия силы. Труды горно-геолог. ин-та, вып. 8, ЗСФАН СССР, Новосибирск, 1950.
5. Суднишников Б. В. и Есин Н. Н. К методике исследования пневматических молотков. Труды горно-геолог. ин-та, вып. 8, ЗСФАН СССР, Новосибирск, 1950.
6. Щеглов В. Ф. Исследование ковочных молотков с клапанным распределением. Известия Томского индустр. ин-та им. С. М. Кирова, т. 57, вып. III, 1939.