

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧЕГО  
ПРОЦЕССА И ЭНЕРГЕТИКИ СОЛЕНОИДНОГО МОЛОТКА  
СО СВОБОДНЫМ ВЫБЕГОМ БОЙКА**

Н. П. РЯШЕНЦЕВ, Е. М. ТИМОШЕНКО

(Представлено кафедрой горных машин и рудничного транспорта)

Исследование соленоидного молотка заключается в изучении процессов, происходящих при его работе, определении характера и величины потерь с целью выбора оптимальных параметров [1] и отыскания путей к повышению к. п. д. и энергии единичного удара молотка.

Исследованию подвергался молоток МС-14 (рис. 1, *a*), ярмо и полюса которого выполнены цельноточеными из стали-3. При исследовании молотка производилась одновременная запись перемещения бойка  $S$ , кривых изменения напряжения  $u$  и тока  $i$ , протекающего в катушке, с помощью магнитоэлектрического осциллографа типа МПО-2. Схема включения шлейфов представлена на рис. 2, общий вид экспериментальной установки — на рис. 3. Запись осциллограмм напряжения тока и хода бойка производилась при напряжении сети 172 в. Согласно показаний приборов напряжение на катушке при этом было  $U=150$  в, ток катушки —  $I=5,3$  а, мощность, потребляемая молотком,  $P_c = 360$  вт.

Характер изменения напряжения на катушке и тока, протекающего в ней (рис. 1, *г*, 4, *a*) определяется характером и величиной приложенного напряжения, свойствами магнитопровода, электрическими параметрами цепи и скоростью их изменения за цикл работы молотка.

Диаграмма хода бойка (рис. 1, *г*, 4, *a*) записывалась при помощи индукционного датчика, схема и конструкция которого разработаны в ТПИ. На диаграмме хода бойка точка *a* соответствует моменту удара об инструмент, точка *б* и *в* показывают начало и конец правого полюса катушки, точка *г* соответствует моменту прикосновения бойка к пружине (начало сжатия пружины), точка *д* — заднему крайнему положению бойка (максимальному сжатию пружины), точка *е* — моменту прекращения действия на боек упругих сил пружины и точки *к* и *м* показывают начало и конец левого полюса катушки (рис. 1, *в*).

Для анализа работы молотка методом графического дифференцирования построены кривые изменения скорости  $V$  бойка за цикл и ускорения или в другом масштабе—результатирующей силы  $F_p$  (рис. 4, *б*), действующей на боек на всем пути его движения, которая определяется выражением

$$F_p = F \pm F_n \pm F_0 \pm F_3 + F_y - F_T, \quad (1)$$

где

- $F$  — сила тяги катушки;
- $F_n$  — сила, развиваемая пружиной;
- $F_0$  — упругие силы воздушного буфера, образовавшегося между бойком и инструментом или между бойком и поршнем демпфера;

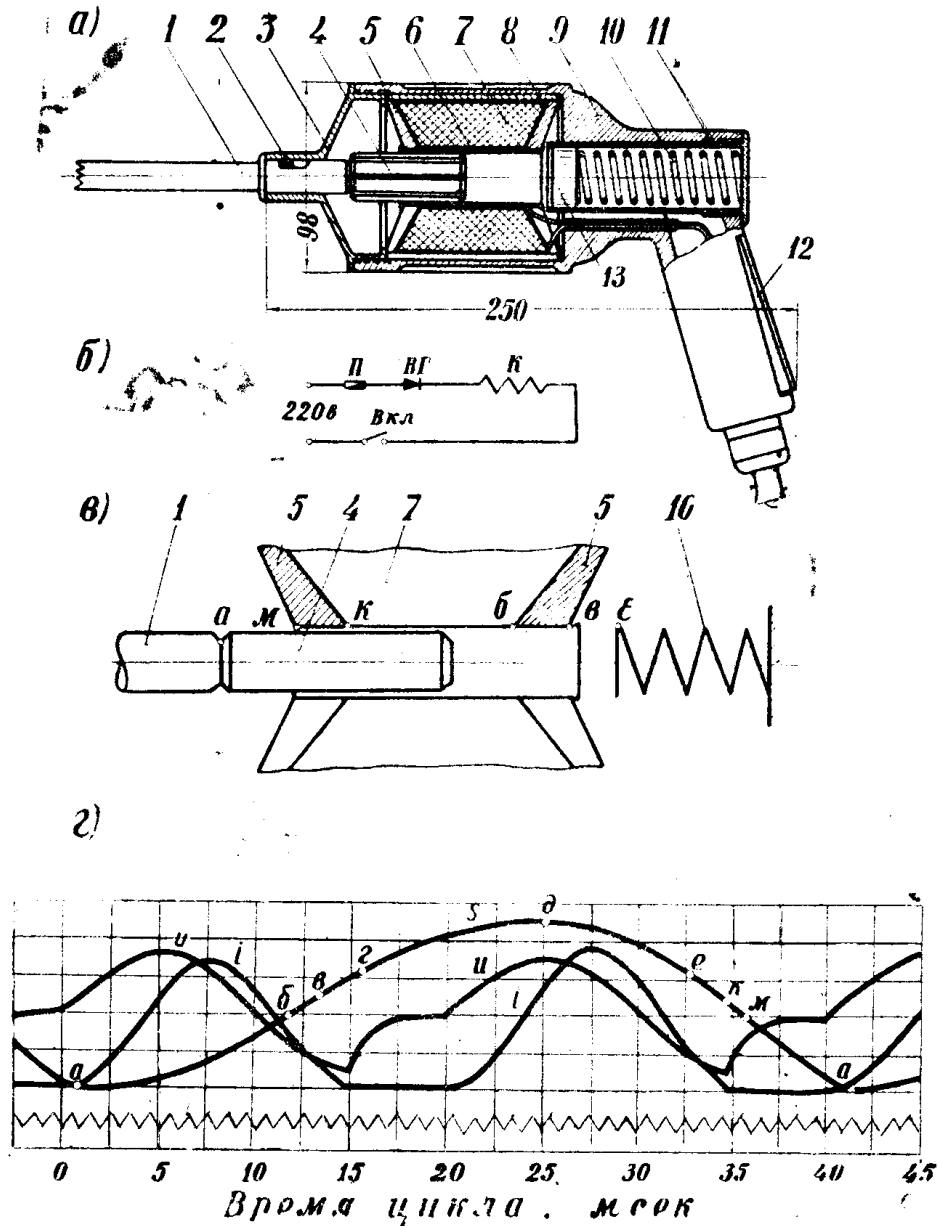


Рис. 1. Соленоидный молоток МС-14:  
а—общий вид; б—схема включения; в—схема молотка; г—осциллограмма тока перемещения бойка  $S$  и напряжения  $и$ .

- $F_3$  — силы, обусловленные остаточной индукцией и вихревыми токами, величина которых зависит от свойств материала магнитопровода и конструктивного исполнения молотка;
- $F_y$  — среднее значение силы реакции инструмента за время удара

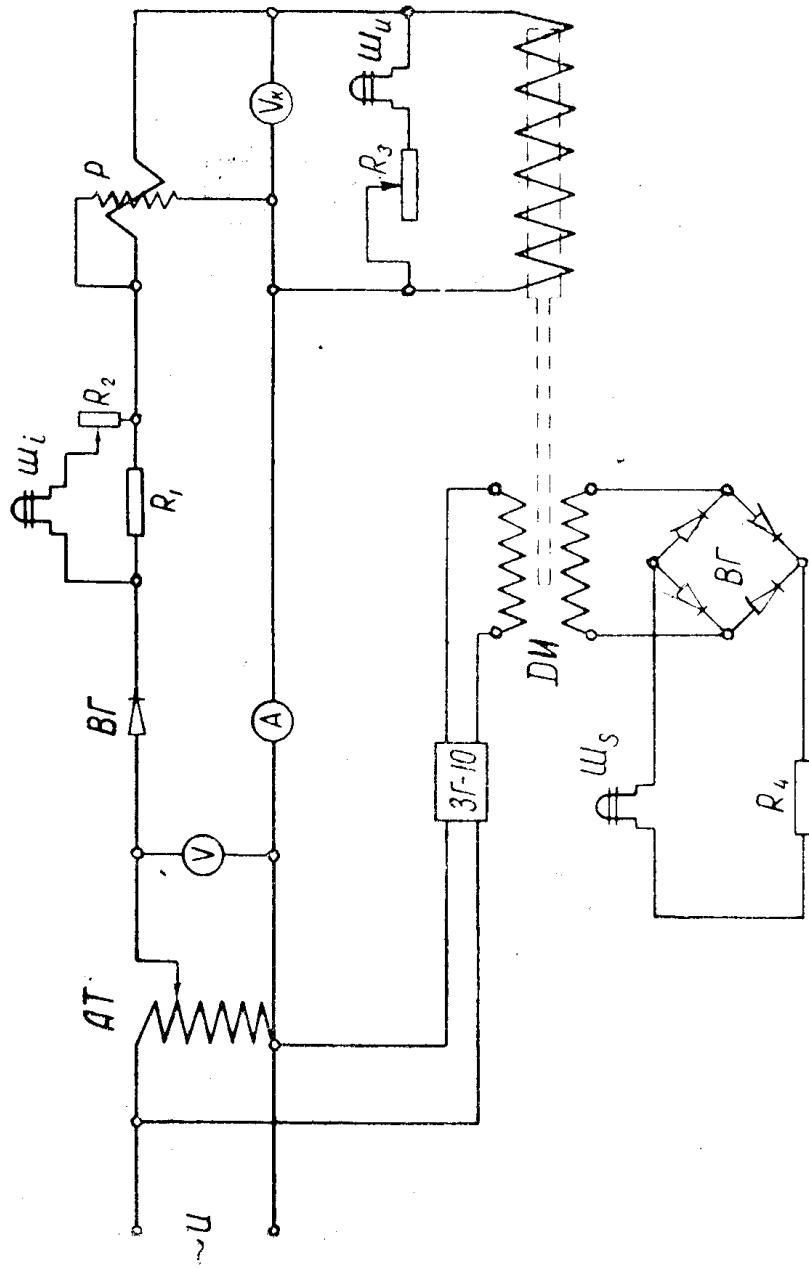


Рис. 2. Схема включения приборов и шлейфов перемещения бойка S, тока  $i$  и напряжения  $u$ .

$$F_y = \frac{mV_y(1+e)}{\tau}, \quad (2)$$

$e = \frac{V_{от}}{V_y}$  — коэффициент восстановления при ударе;

$V_y, V_{от}$  — скорости бойка соответственно в момент удара и отскока;

$F_r$  — сила трения бойка о направленную трубку, которая зависит от коэффициента трения и силы нормального давления.

Следует отметить, что в случае несовпадения оси бойка с магнитной осью соленоида в результате электромагнитных сил увеличивается давление бойка на направляющую трубку. Это ведет к увеличению противодействующих сил, величина которых переменна и зависит от положения бойка и тока, протекающего в катушке.

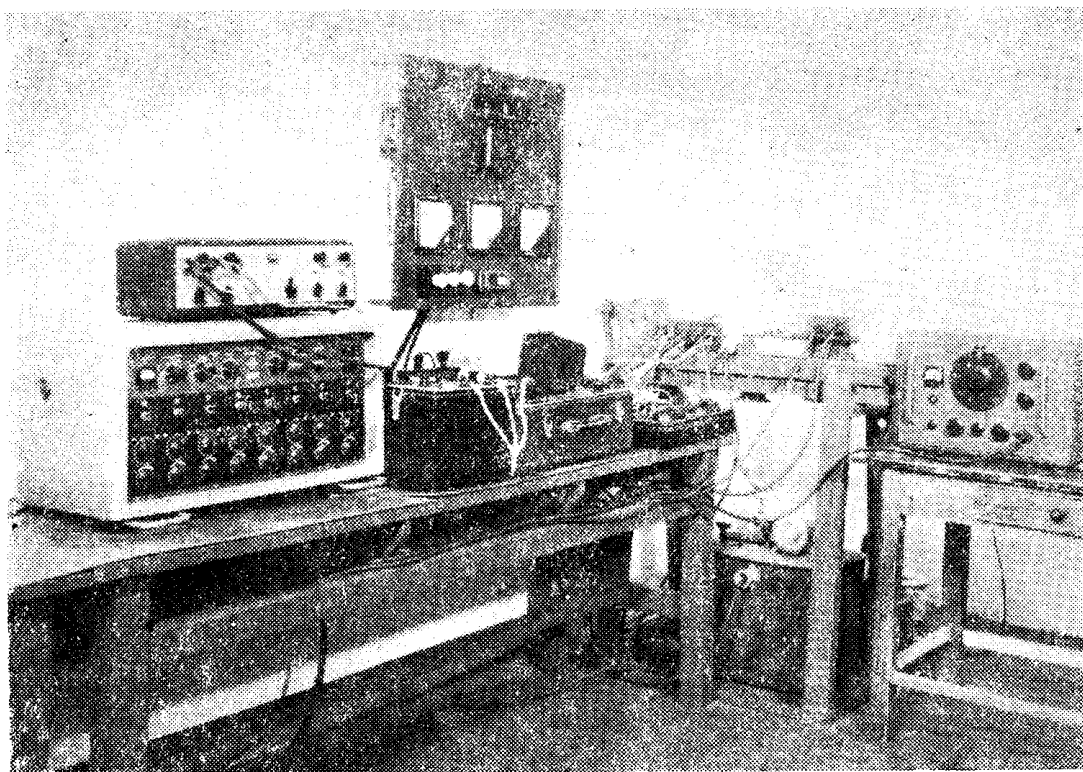


Рис. 3. Общий вид экспериментальной установки.

Из приведенных осциллограмм видно, что при движении бойка в сторону пружины после выхода его из положения магнитного равновесия, ток в катушке продолжает протекать и на участке пути *б, з*, заметно резкое торможение. Сила тяги катушки на этом участке меняет свой знак на противоположный и достигает максимального тормозного значения в точке *з*. К моменту времени, равному 17 миллисекунд, магнитное поле соленоида сворачивается, действие тормозных сил на боек значительно уменьшается. Тормозные силы, действующие на участке пути от 12 до 17 миллисекунд, нельзя считать вызванными только электромагнитным торможением, так как кроме последнего в это же время, как и на всем пути движения бойка, действуют механические тормозные силы, обусловленные трением бойка о стенки направляющей трубы, а также упругие силы воздушного буфера, образовавшегося между бойком и поршнем (рис. 1, *а*). На участке пути *з—е* на боек действуют

упругие силы демпферной пружины, величина которых определяется по формуле

$$F_n = c_s I_n,$$

где

$c_s$  — жесткость пружины, кг/мм;

$I_n$  — величина сжатия пружины, определяется из осциллограммы хода бойка  $S$  (рис. 4, а), мм.

Чтобы определить величину тормозных сил за время цикла от 16 до 20 миллисекунд, необходимо из действующих сил на боек вычесть силы пружины, т. е.  $F_T + F_0 + F_s = F_p - F_n$ . После момента времени, равного 20 миллисекундам, начинает протекать ток в катушке, но боек еще продолжает движение в сторону сжатия пружины. При этом наблюдается электромагнитное торможение. Однако по своей величине тормозные электромагнитные силы незначительны, так как в это время ток, протекающий в катушке, сравнительно невелик, а воздушный рабочий зазор достигает максимального значения. После того, как боек достигнет крайней точки  $d$  и начнет движение к инструменту, действие электромагнитных сил катушки и упругих сил пружины совпадает с направлением движения бойка.

Кривая  $A$  (рис. 4, в) показывает изменение кинетической энергии бойка  $\left( A = \frac{mV^2}{2} \right)$  за время цикла. В точке  $b$  кинетическая энергия бойка в первой половине цикла достигает максимального значения, равного 0,32 кгм, но до момента подхода к демпферной пружине (точка  $z$ ) уменьшается на 40%, что свидетельствует о большой величине тормозных сил на этом участке. Далее кинетическая энергия бойка расходуется на механические потери и на аккумуляцию энергии в демпферной пружине. В точке  $d$  кинетическая энергия бойка равна нулю. Затем кинетическая энергия бойка в результате действия упругих сил пружины и электромагнитных сил катушки увеличивается и в момент удара бойка (точка  $a$ ) о хвостовик рабочего инструмента достигает  $A = 0,43$  кгм, откуда полезная мощность молотка при частоте ударов  $n = 1500$  уд/мин будет

$$P_2 = \frac{A \cdot n}{0,102 \cdot 60} = \frac{0,43 \cdot 1500}{0,102 \cdot 60} = 105 \text{ вт} \quad (3)$$

и к. п. д. молотка (без учета к. п. д. передачи кинетической энергии при ударе)

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{105}{360} = 0,292 \text{ или } 29,2 \%$$

Чтобы определить пути повышения к. п. д. молотка, нужно знать не только результирующий к. п. д., но и характер распределения потребляемой мощности за цикл. Для этого рассмотрим уравнение баланса мощностей.

Умножая уравнение электрического равновесия [2] на мгновенное значение тока, получаем

$$u \cdot i = i^2 R + Li \frac{di}{dt} + i^2 \frac{dL}{dt} \quad (4)$$

Известно, что энергия магнитного поля

$$W_m = \frac{Li^2}{2}$$

и скорость ее изменения

$$\frac{dW_m}{dt} = \frac{d \frac{Li^2}{2}}{dt} = Li \frac{di}{dt} + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dt} \quad (5)$$

Подставляя выражения для производной индуктивности по времени и тока катушки, приведенных в статье [3] и (5) в уравнение (4), имеем

$$u \cdot i = i^2 R + \frac{d \frac{Li^2}{2}}{dt} + F \cdot V \quad (6)$$

или, что то же самое

$$P_c = P_m + P_s + P_b, \quad (7)$$

где

$P_c = u \cdot i$  — мгновенное значение мощности, потребляемой из сети;

$P_m = i^2 R$  — мгновенное значение мощности, расходуемой на потери в меди;

$P_s = \frac{d \frac{Li^2}{2}}{dt} + (F - F_p)V$  — сумма соответственно скорости изменения

энергии магнитного поля соленоида и мгновенного значения мощности, расходуемой бойком на механические потери при  $(F - F_p)V > 0$  или — потребляемой им при  $(F - F_p)V < 0$  от внутреннего источника энергии, например, демпферной пружины;

$P_p = F_p V$  — мощность, потребляемая (при  $F_p V > 0$ ) или отдаваемая (при  $F_p V < 0$ ) бойком.

В том случае, когда сила тяги катушки направлена встречно движению бойка (электромагнитное торможение), энергия, накопленная бойком, расходуется на увеличение энергии магнитного поля, которая частично отдается в сеть, рассеивается в виде тепла и при определенных условиях совершает полезную работу.

Кривые изменения  $P_c$ ,  $P_m$ ,  $P_s$  и  $P_b$  (рис. 4, в) дают наглядную картину превращения электрической энергии в механическую. При построении кривых мощности  $P_c$ ,  $P_m$  и  $P_b$  значения тока  $i$ , напряжения  $u$  брались из осциллограмм (рис. 4, а), активное сопротивление обмотки  $R$  замерялось универсальным мостом постоянного тока типа УМВ, мгновенное значение скорости бойка  $V$  и силы  $F_p$ , действующей на него, определялись из соответствующих диаграмм (рис. 4, б). Мгновенное значение  $P_s$  определялось алгебраическим суммированием мощностей  $P_c$ ,  $P_m$  и  $P_b$ .

Из рис. 4, в видно, что с момента начала движения бойка в сторону пружины потребляемая из сети мощность  $P_c$  расходуется на потери в меди, стали и механические, увеличение энергии магнитного поля соленоида и на создание полезной работы. В интервале времени от 8 до 10 миллисекунд на покрытие потерь и создание полезной работы расходуется и магнитная энергия соленоида, а с момента времени 10 миллисекунд магнитная энергия соленоида, кроме того, частично отдается в сеть.

Во второй половине цикла характер распределения мощности аналогичен первой половине цикла. При известных величинах тока, индуктивности соленоида и скорости их изменения во время работы молотка

можно определить величину тормозных сил в любой точке пути бойка. Это позволит произвести полный анализ распределения потребляемой энергии молотком и определить пути уменьшения потерь.

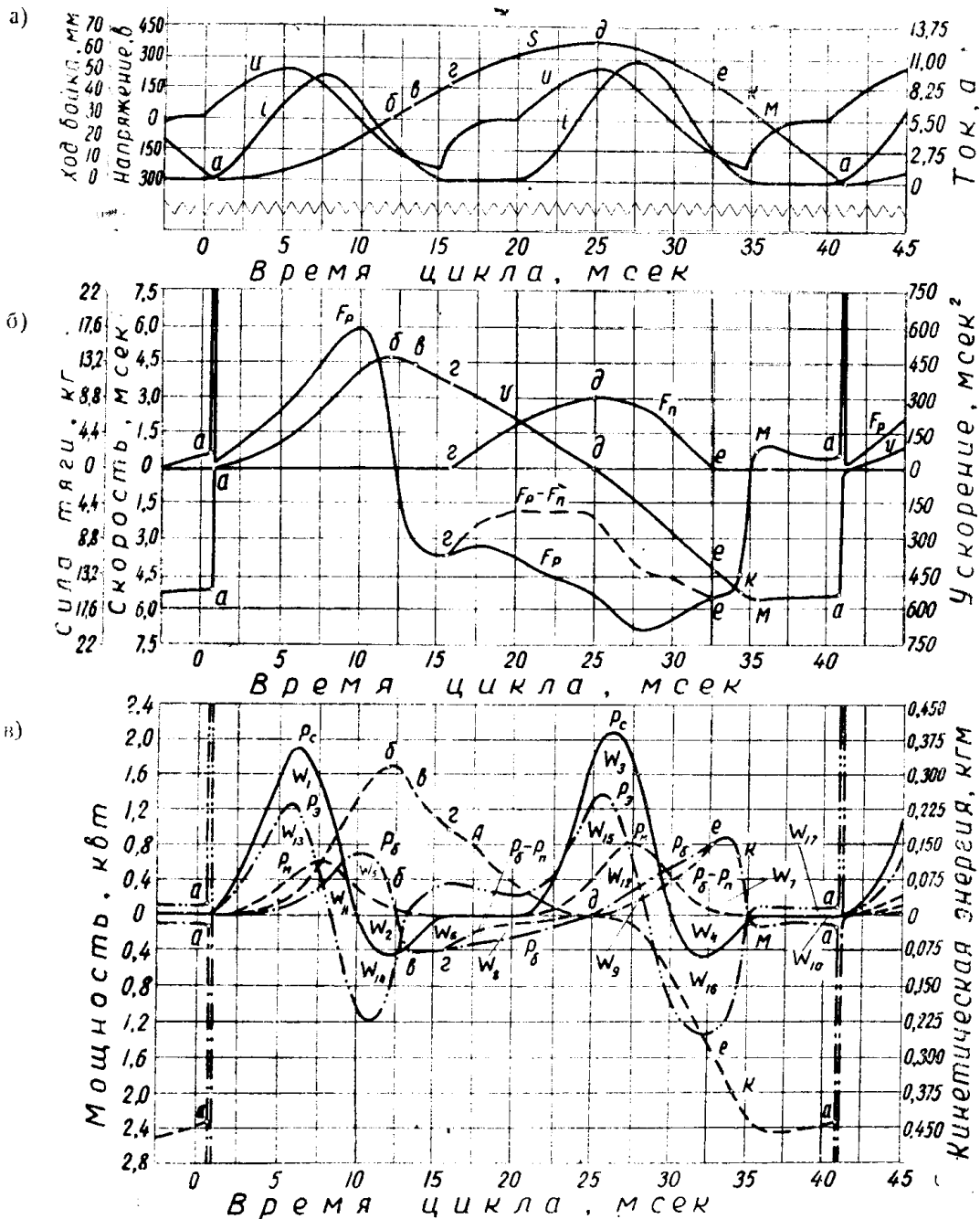


Рис. 4. Диаграмма рабочего процесса соленоидного молотка МС-14: а—осциллограммы перемещения бойка  $S$ , тока  $i$  и напряжения  $u$ ; б—диаграммы скорости движения бойка  $U$ , результирующей силы с учетом упругих сил пружины; в—диаграммы мощности:  $P_c$ —потребляемой из сети,  $P_m$ —затрачиваемой на потери в меди;  $P_0$ —потребляемой или отдаваемой бойком;  $P_3$ —сумма скорости изменения энергии магнитного поля и мощности, расходуемой бойком на механические потери, или потребляемой бойком от внутреннего источника энергии;  $A$ —диаграмма кинетической энергии бойка.

Приведенные на рис. 4, в кривые изменения мощностей позволяют в количественном отношении установить распределение энергии, по-

требляемой молотком, так как площади, ограниченные каждой кривой и осью времени, определяют величину соответствующей энергии.

Площади, ограниченные кривой  $P_c$  и осью времени, определяют энергию  $W_1, W_3$  и  $W_2, W_4$  (рис. 4, в), потребляемую из сети и отдаваемую в сеть за первую и вторую половину цикла. Потери энергии в меди  $W_{11}$  и  $W_{12}$  (рис. 4, а) соответственно за первую и вторую половину цикла определяются площадями, ограниченными кривой мощности  $P_m$  и горизонтальной осью. Энергия, расходуемая на все потери (кроме потерь в меди), определяется алгебраической суммой площадей, ограниченных кривой  $P_s$  и горизонтальной осью (рис. 4, в).

$$W_7 = W_{13} - W_{14} + W_{15} - W_{16} + W_{17}.$$

Кинетическая энергия, накопленная бойком при его движении в сторону пружины  $W_5$ , расходуется на электромагнитное торможение, механические потери и сжатие демпферной пружины  $W_8$  (в сумме составляющие  $W_6$ ).

Запас кинетической энергии бойка к моменту удара  $W_n = W_7 - W_{10}$  (рис. 4, в) определяется алгебраической суммой площадью ограниченной кривой  $P_6$  во второй половине цикла и осью времени.

Численное значение энергии определялось умножением соответствующей площади, выраженной в  $мм^2$ , на масштабный коэффициент  $k = m_p m_t$ , где  $m_p$  — масштаб мощности,  $вт/мм$ ,  $m_t$  — масштаб времени,  $сек/мм$ . На основании результатов проведенных расчетов построена энергетическая диаграмма (рис. 5) молотка МС-14. Из приведенной диаграммы видно, что к. п. д. молотка (без учета к. п. д. передачи кинетической энергии при ударе) составляет 29,2% и наибольшее количество потребляемой из сети энергии (48,7%) расходуется на тепловые потери в меди.

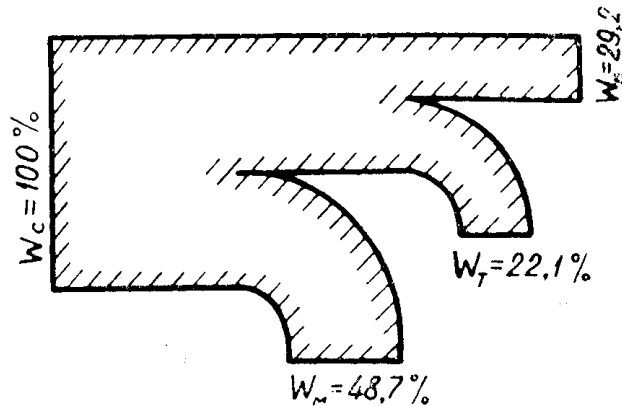


Рис. 5. Энергетическая диаграмма молотка МС-14.

При исследовании соленоидного молотка интерес представляет и определение к. п. д. соленоида отдельно за первую и вторую половину цикла работы молотка. К. п. д.

ориентировочно может быть определен следующим образом. Полезная работа соленоида за первую половину цикла равна потенциальной энергии, накопленной демпферной пружиной. На рис. 4, в последняя обозначена  $W_8$  и определяется площадью, заключенной между кривыми  $P_6$  и  $P_6 - P_n$ . Энергия, потребляемая из сети на создание этой полезной работы, равна  $W_1 - W_2$  (рис. 4, в) и к. п. д. соленоида за первую половину цикла

$$\eta_1 = \frac{W_8}{W_1 - W_2} 100 = 12,3 \text{ \%}.$$

К. п. д. соленоида за вторую половину цикла определяется выражением

$$\eta_2 = \frac{W_7 - W_{10}}{W_3 - W_4 + W_8} 100 = 42,9 \text{ \%},$$



где  
 $W_7 - W_{10}$  — запас кинетической энергии бойка к моменту удара;  
 $W_3$  и  $W_1$  — соответственно энергия, потребленная из сети и отданная в сеть во второй половине цикла.

Высокий к. п. д. соленоида во второй половине цикла показывает, что даже при такой несовершенной конструкции магнитопровода лабораторного образца молотка МС-14 (ярмо и полюса цельноточеные, боек без пазов) имеются большие возможности увеличения к. п. д. путем выбора рациональных параметров, устраняющих электромагнитное торможение бойка. Кроме того, в целях увеличения к. п. д. молотка следует уменьшить силы трения бойка о стенки направляющей трубы путем уменьшения коэффициента трения (обработка, смазка) и уменьшения сил, нормально действующих на поверхность трения (снижение до минимума разности величин воздушного зазора по периметру «воротничка»).

Для уменьшения потерь в стали необходимо магнитопровод (ярмо и полюса) выполнять из порошкового материала или шихтованным из электротехнической стали. Боек из соображений механической прочности нельзя выполнить наборным. Его следует изготавливать из стали 5ХВС [4] с пазами. Наличие пазов на бойке снижает потери на вихревые токи, уменьшает силы, противодействующие перемещению бойка, возникающие вследствие образования воздушного буфера, и увеличивают отвод тепла.

Устранение электромагнитного торможения, снижение потерь в стали и механических повлечет за собой уменьшение энергии, потребляемой из сети, а следовательно, к уменьшению потерь в меди. Кроме того, с целью снижения потерь в меди, следует уменьшить до минимума величину паразитных воздушных зазоров в местах сочленения ярма, полюсов и бойка и произвести выбор рациональных геометрических

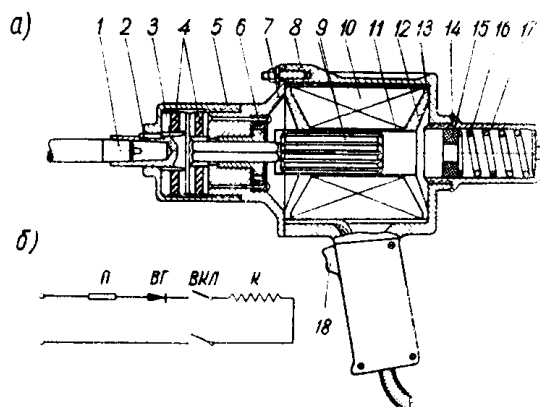


Рис. 6. Соленоидный молоток МС-15:  
а — разрез молотка; б — схема включения;

размеров соленоида. С учетом проведенных исследований был разработан соленоидный молоток МС-15 (рис. 6). Молоток состоит из инструмента 1, закрепленного в патроне 3, фасонных шайб 4, переднего фланца 7, корпуса 8, бойка 9, который движется в направляющей трубе 11, изготовленной из нержавеющей стали IX18Н9Т, катушки 10, полюса 12 и ярма 13, изготовленных наборными из электрической стали, стопорной пружины 14, текстолитового поршня 15, демпферной пружины 16 с гайкой 17 и выключателя 18. Работает молоток МС-15 подобным образом и как молоток МС-14 [1].

#### Техническая характеристика молотка МС-15

1. Двигатель — соленоидного типа.
2. Число катушек — 1.
3. Частота тока — 50 гц.
4. Напряжение сети — 220 в.
5. Род тока — переменный, однофазный.

6. Потребляемая мощность — 320 вт.
7. Энергия удара — 0,45 кдж.
8. Число ударов — 1500 ударов в минуту.
9. Габаритные размеры — 110 × 250 мм.
10. Вес (без кабеля и инструмента) — 5,5 кг.

Молоток подключается к сети через преобразовательную подстанцию с германиевыми выпрямителями типа ВГ-10-80.

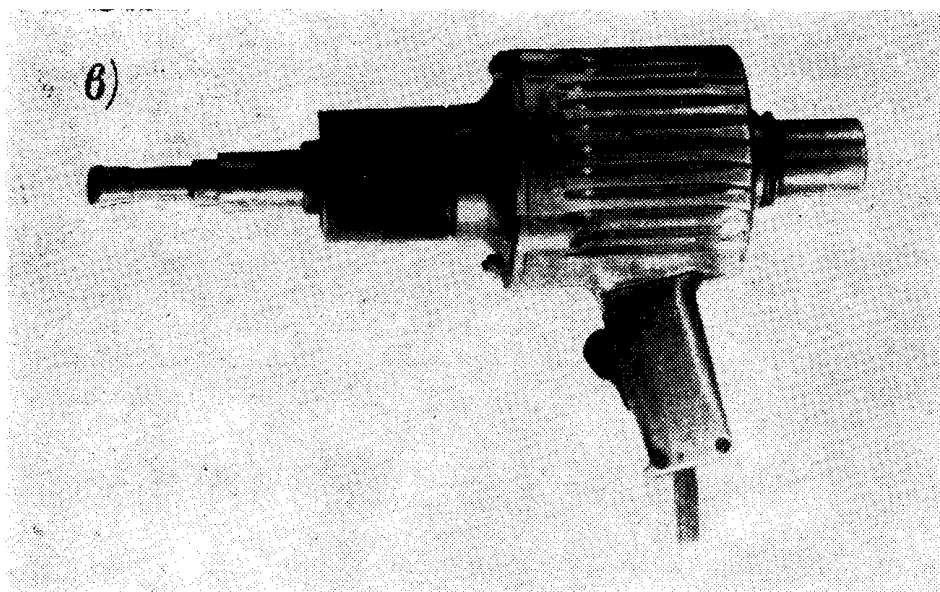


Рис. 6б. Общий вид соленоидного молотка МС-15.

Для исследования рабочего процесса молотка производилась одновременная запись перемещения бойка  $S$ , кривых изменения напряжения  $u$ , мощности  $P$  и тока  $i$ , протекающего в катушке (рис. 7, а). Схема включения приборов представлена на рис. 2, общий вид экспериментальной установки на рис. 3.

Посредством графического дифференцирования кривой перемещения бойка  $S$  были построены кривые изменения скорости  $V$  бойка за цикл и ускорения или в другом масштабе результирующей силы  $F_p$  (рис. 7, б), действующей на всем пути движения бойка и упругих сил пружины  $F_n$ . Затем по вышеописанному способу были построены кривые (рис. 7, в) мощности, потребляемой из сети  $P_c = u \cdot i$ , расходуемой на потери в меди  $P_m = i^2 R$ ; мощности, потребляемой или отдаваемой бойком  $P_6 = F_p \cdot V$ ; суммы скорости изменения энергии магнитного поля соленоида и мгновенного значения мощности, потребляемой или отдаваемой бойком,

$$P_3 = \frac{d}{dt} \frac{Li^2}{2} + (F - F_p) V.$$

Из приведенных осциллограмм, кривых изменения скорости движения бойка и результирующей силы, а также кривых мощности видно, что молоток МС-15 работает без явно выраженного электромагнитного торможения бойка. Обозначение энергии за время цикла работы молотка МС-15 соответствует обозначениям энергии молотка МС-14, распределение которых описано выше. Энергетическая диаграмма молотка

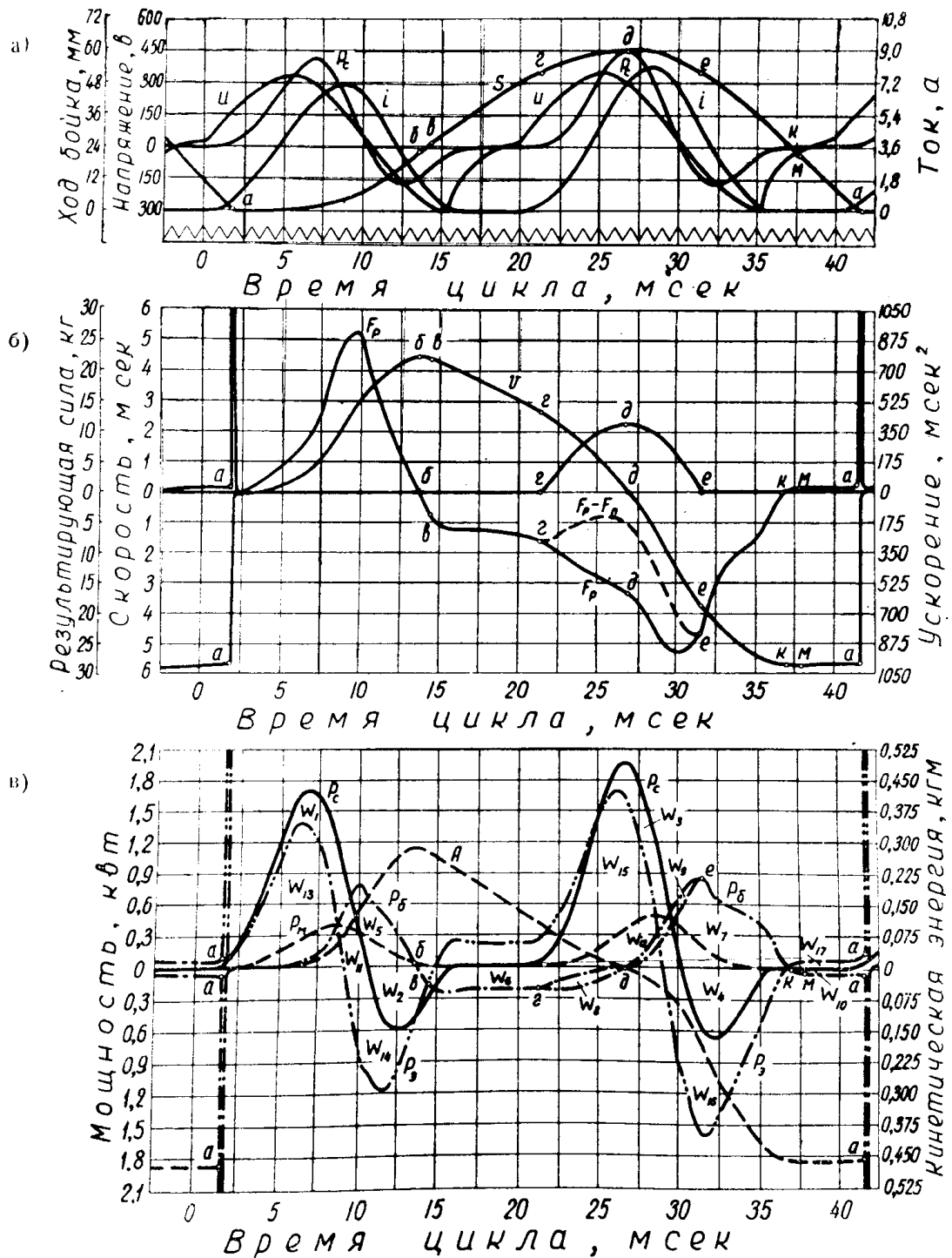


Рис. 7. Диаграмма рабочего процесса соленоидного молотка МС-15: а—осциллограммы перемещения бойка  $S$ , тока  $i$ , напряжения  $u$  и мощности  $P_c$ ; б—диаграммы скорости движения бойка  $U$ , результирующей силы  $F_p$  с учетом упругих сил пружины и  $F_p - F_n$  — тоже без упругих сил пружины; в—диаграммы мощности:  $P_c$  — потребляемой из сети,  $P_m$  — затрачиваемой на потери в меди,  $P_6$  — потребляемой или отдаваемой бойком,  $P_3$  — сумма скорости изменения энергии магнитного поля и мощности, отдаваемой или потребляемой бойком,  $A$  — диаграмма кинетической энергии бойка.

МС-15, представленная на рис. 8, показывает, что к. п. д. молотка (без учета передачи кинетической энергии при ударе) составляет 33,3%,

значительная часть энергии (36%) расходуется на омические потери, прочие потери составляют 30,7%. В приведенной конструкции молотка путем выбора рациональных параметров молотка и применения наборных из электротехнической стали полюсов и ярма удалось уменьшить потери в меди.

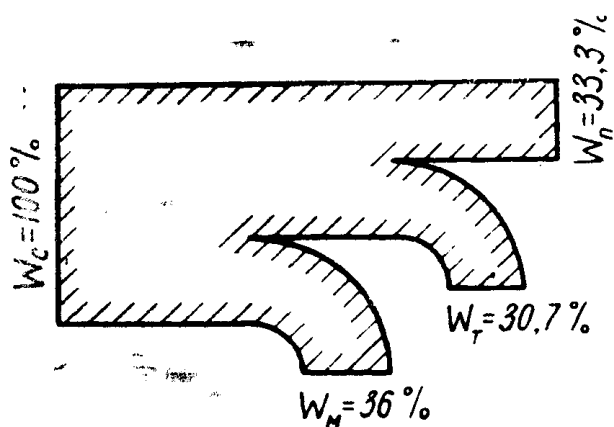


Рис. 8. Энергетическая диаграмма молотка МС-15.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ряшенцев Н. П., Тимошенко Е. М., Фролов А. В., Гронов А. П., О параметрах соленоидного молотка со свободным выбегом бойка. Статья помещена в настоящем сборнике.
2. Буйлов А. Я., Основы электроаппаратостроения. Госэнергоиздат, 1946.
3. Ряшенцев Н. П., Тимошенко Е. М., К теории соленоидного молотка со свободным выбегом бойка. Статья помещена в настоящем сборнике.
4. Ряшенцев Н. П., Фролов А. В., К вопросу уменьшения потерь в стали соленоидного молотка. Известия Томского политехнического института, т. 108, Металлургия, Свердловск, 1959.