

## О ДИНАМИКЕ СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА КОРПУС ПНЕВМАТИЧЕСКОГО МОЛОТКА

В. Ф. ГОРБУНОВ, В. И. БАБУРОВ

(Представлена кафедрой горных машин и рудничного транспорта)

Вибрация ручных пневматических молотков приводит к заболеванию рабочих вибрационной болезнью. Поэтому исследование вибрации, проводимое с целью создания ручных машин, безопасных в вибрационном отношении, имеет большое практическое значение. В настоящее время многими учеными и изобретателями предложено много различных способов для уменьшения воздействия вибрации на человека.

В нашей статье [1] показано, что проблема виброизоляции и гашения вибрации может быть решена только при комплексном применении различных способов. Это заключение вытекает, в частности, из того, что при работе молотка на него действуют разные силы, которые переменны по своей величине и по продолжительности действия. В результате этого амплитудно-силовая характеристика молотков является качественно сложной, с наличием перегибов в виде максимумов и минимумов [1—3]. В статье [2] в зависимости от величины усилия нажатия нами выделен ряд наиболее характерных режимов работы молотка — первый переходный, плавающий, второй переходный, предельно основной, третий переходный и режим, в котором вибрация корпуса осуществляется только от обратных ударов инструмента. За внешний признак названных режимов принята геометрическая форма колебаний машины.

Настоящая работа посвящена анализу сил, действующих на корпус ручных пневматических молотков, при различных режимах их работы. На рис. 1 изображены геометрические формы колебаний корпуса молотка КЕ-16 при давлении воздуха в сети 5 атм и рубке стальной заготовки.

### а) Первый переходный режим

Первый переходный режим представляет собой наиболее неустойчивый режим работы молотка.

Усилие нажатия в этом режиме равно минимально допустимому и настолько мало, что корпус молотка в каждом цикле все дальше и дальше удаляется от обрабатываемого изделия. Перемещение его назад осуществляется до тех пор, пока отход не станет равным величине ограничения хода ударника хвостовиком рабочего инструмента. Следовательно, наибольший отход молотка определяется его конструкцией. Геометрическая форма колебаний корпуса, соответствующая первому переходному режиму, показана на рис. 1, а. Колебания молотка осуще-

ствляются под действием силы соударения ударника с корпусом  $F$ , усилия нажатия  $R_n$  и давления сжатого воздуха  $P_t$ , причем амплитуда колебаний  $A$  максимальная (рис. 1, а).

Известно, что сжатый воздух, поступающий в переднюю полость, производит давление одновременно на ударник и ограничительную перемычку машины. Причем, импульс от давления воздуха на ударник со стороны передней полости (назовем этот импульс начальным) затрачивается на сжатие воздуха в задней полости и, таким образом, также

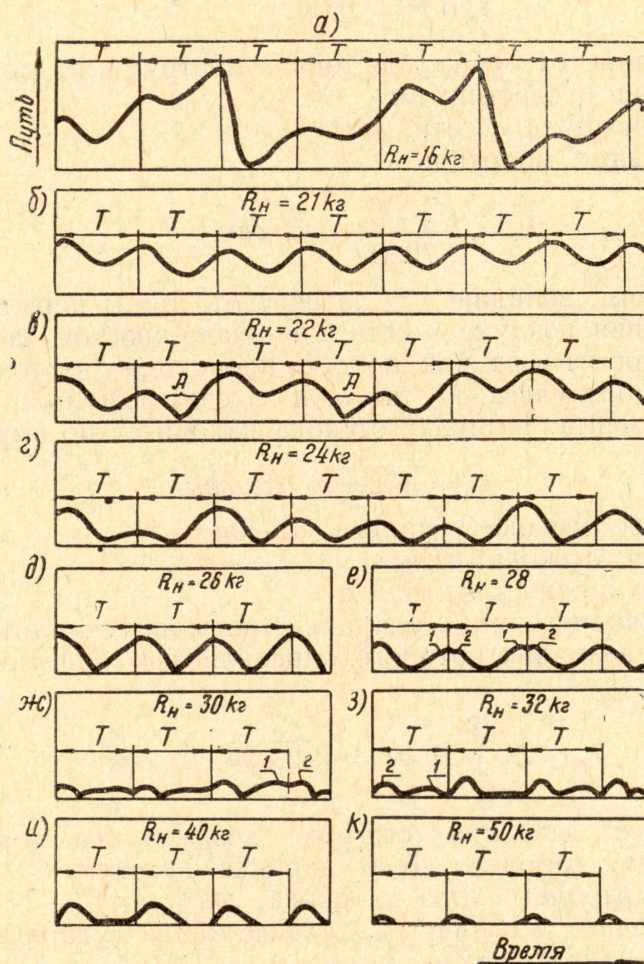


Рис. 1. Геометрические формы колебаний корпуса пневматического молотка

передается на корпус. Следовательно, результирующее действие начального импульса на корпус равно

$$I_n = F_y \int_0^{t_n} P_n dt - (F_y - f_u) \int_0^{t_n} P_n dt = f_u \int_0^{t_n} P_n dt, \text{ кг} \cdot \text{сек}, \quad (1)$$

где  $I_n$  — величина начального импульса, оказывающая действие на корпус молотка,  $\text{кг} \cdot \text{сек}$ ;

$P_n$  — переменное по величине и времени давление воздуха в передней полости,  $\text{кг/см}^2$ ;

$t_n$  — время действия давления воздуха в передней полости,  $\text{сек}$ ;

$F_y$  — площадь поперечного сечения ударника,  $\text{см}^2$ ;

$f_u$  — площадь поперечного сечения хвостовика рабочего инструмента,  $\text{см}^2$ .

Авторами получены эмпирические выражения для определения импульса  $I_n$  (1) у рубильных и клепальных молотков в условиях их работы по стали.

Для клепальных молотков

$$I_n = \frac{f_u S P_0}{870 P_0 + 3600}, \text{ кг} \cdot \text{сек}, \quad (2)$$

где  $S$  — расстояние от торца хвостовика инструмента до центра выхлопных отверстий,  $\text{см}$ ;

$P_0$  — давление воздуха в сети,  $\text{кг}/\text{см}^2$ .

Для рубильных молотков

$$I_n = \frac{f_u S P_0}{7000}, \text{ кг} \cdot \text{сек}. \quad (3)$$

Таким образом, величина  $I_n$  зависит от длины передней полости молотка, давления воздуха в сети и площади хвостовика инструмента.

Сжатие воздуха в задней полости происходит не только вследствие начального импульса, но также и за счет импульса отскока ударника от инструмента. Импульс отскока находится по выражению

$$I_0 = \sqrt{2A_0 m}, \text{ кг} \cdot \text{сек}, \quad (4)$$

где  $I_0$  — импульс отскока ударника,  $\text{кг} \cdot \text{сек}$ ;

$A_0$  — энергия отскока,  $\text{кГм}$ ;

$m$  — масса ударника,  $\text{кг} \cdot \text{сек}^2/\text{м}$ .

За время рабочего хода ударника на корпус молотка действует импульс силы, величина которого определяется кинетической энергией ударника [4]

$$I_p = F_y \int_0^{t_p} P_p dt = \sqrt{2A_y m}, \text{ кг} \cdot \text{сек}, \quad (5)$$

где  $I_p$  — импульс давления сжатого воздуха на корпус молотка за время рабочего хода ударника,  $\text{кг} \cdot \text{сек}$ ;

$t_p$  — время рабочего хода ударника,  $\text{сек}$ ;

$P_p$  — переменное давление воздуха на корпус (ударника) на участке времени  $t_p$  цикла,  $\text{кг}/\text{см}^2$ ;

$A_y$  — энергия удара ударника,  $\text{кГм}$ .

Величину импульса силы  $F$ , действующей на молоток в момент удара ударника по перемычке, можно вычислить, приравняв его к изменению количества движения корпуса машины, т. е.

$$I_F = \int_0^t F dt = m_k V_k'' - (-m_k V_k'), \text{ кг} \cdot \text{сек}, \quad (6)$$

где  $I_F$  — импульс силы  $F$  от соударения ударника с корпусом,  $\text{кг} \cdot \text{сек}$ ;

$t$  — время соударения ударника с корпусом,  $\text{сек}$ ;  $V_k'$ ;  $V_k''$  — скорости корпуса до и после соударения,  $\text{м}/\text{сек}$ .

Определить  $V_k'$  и  $V_k''$  аналитическим путем практически невозможно, так как на корпус молотка, кроме силы удара, действуют сила нажатия, сила инерции, давление воздуха. Графическое дифференцирование виброграммы для определенных условий работы молотка показы-

вает, что скорость  $V_k''$  пропорциональна скорости ударника перед ударом, причем коэффициент пропорциональности определяется соотношением масс корпуса и ударника. По данным дифференцирования скорость корпуса  $V_k''$  молотка КЕ-22 в первом переходном режиме при 5 ати равна 0,5—0,65 м/сек. Скорость ударника при этом составляет 10,0—10,7 м/сек, т. е. скорость корпуса почти во столько раз меньше скорости ударника, во сколько масса первого больше массы второго.

$$\text{Таким образом, } V_k'' = V_y \frac{m}{m_k}. \quad (7)$$

Из закона сохранения импульса следует

$$R_n T + I_F - I_p - I_0 - I_n = 0. \quad (8)$$

Подставив в выражение (8) значения импульсов и объединив импульсы  $I_p$  и  $I_0$ , получим формулу для определения усилия нажатия для первого переходного режима

$$R_n = \frac{n}{60} \left[ V \sqrt{2A_y m} (\kappa_0 + 1) + f_n \int_0^{t_n} P_n dt \right] - \frac{n'}{60} \int_0^t F dt, \text{ кг}, \quad (9)$$

где  $R_n$  — приведенное усилие нажатия (с учетом веса молотка), кг;

$\kappa_0$  — коэффициент отскока ударника;

$n$  — частота ходов бойка в минуту;

$n'$  — частота ударов бойка по корпусу молотка, уд/мин.

Соударения ударника и корпуса осуществляются не в каждом цикле. Частота соударений зависит от усилия нажатия. Найдем величину усилия нажатия, при котором удары по перемычке будут происходить в каждом цикле работы машины.

Если вся кинетическая энергия ударника будет передаваться корпусу, т. е. соударения ударника и корпуса происходят в каждом цикле, то будет справедливым равенство

$$I_p = I_F \text{ или } V \sqrt{2A_y m} = \int_0^t F dt. \quad (10)$$

Алгебраическая сумма второго и третьего членов выражения (8) обратится в нуль. Следовательно, усилие нажатия для указанного режима работы молотка равно

$$R_n = \frac{n}{60} \left( V \sqrt{2A_0 m} + f_n \int_0^{t_n} P_n dt \right), \text{ кг}. \quad (11)$$

Подставив значения импульса  $I_n$  из формул (2) и (3) в выражение (11), найдем величину гранично минимального усилия нажатия в первом переходном режиме. Для клепальных молотков типа КЕ это усилие при 5 ати равно 9—12 кг, для рубильных молотков типа МР — 4,5—5 кг.

#### б) Плавающий режим

При увеличении усилия нажатия в рассматриваемом случае с 18 до 21 кг молоток переходит в плавающий режим работы. Колебания корпуса осуществляются плавно. Геометрическая форма колебаний близка к синусоидальной (рис. 1, б). Амплитуда вибрации в плавающем режиме значительно меньше, чем в первом переходном [2]. При колебании

корпус не достигает буртика инструмента. Величина силы нажатия, обеспечивающего работу молотка в плавающем режиме, равна

$$R_n = \frac{n}{60} [V\sqrt{2A_y m} (\kappa_0 + 1) + I_n]. \quad (12)$$

В данном случае усилие нажатия компенсирует действие на корпус только внутренней возмущающей силы. Плавающий режим гигиенисты считают наиболее благоприятным с санитарно-гигиенической точки зрения, так как в нем отсутствуют резкие изменения скорости движения корпуса, а сила, действующая на него, изменяется плавно.

Исследованиями А. М. Петреева [5, 6] установлено, что необходимая для поддержания плавающего режима сила нажатия совершенно не зависит от формы индикаторной диаграммы и определяется лишь величиной суммарного импульса силы давления сжатого воздуха, действующего на корпус машины за цикл. При этом сдвиг по фазе между диаграммой результирующего давления воздуха и кривой движения корпуса всегда такой, что безразмерный параметр, выведенный А. М. Петревым,

имеет постоянное значение, равное  $\frac{1}{2}$ .

Несмотря на то, что плавающий режим является наиболее благоприятным в гигиеническом отношении, практическое его использование весьма затруднительно вследствие того, что рабочему необходимо постоянно улавливать требуемый сдвиг по фазе между диаграммами давлений и виброграммой. Однако исследование этого режима имеет практическое значение. Для получения синусоидальной формы колебания рукоятки необходимо стремиться к тому, чтобы все силы, действующие на нее, изменялись плавно.

### в) Второй переходный режим

Незначительное увеличение усилия нажатия выводит работу машины из плавающего режима. Корпус молотка осуществляет сложные колебательные движения, характеризующиеся постепенным отходом от ограничительного буртика инструмента и последующим приближением к нему (рис. 1, в). Геометрическая форма колебаний корпуса в отдельных циклах хода ударника близка к плавающему режиму, в других она сходна с формой колебаний предельно основного режима (рассматривается ниже). Чередование подобных форм в этом переходном режиме происходит периодически. Это легко устанавливается при изучении виброграмм.

Амплитуда вибрации корпуса машины во втором переходном режиме с увеличением усилия нажатия возрастает [2]. Возрастание амплитуды, по нашему мнению, объясняется тем, что в этом режиме работы молотка на его корпус начинают действовать новые силы, возникающие при соударении с ограничительным буртиком инструмента. От действия сил  $N$  при посадках корпус получает дополнительный импульс  $I_N$ , величина которого зависит от массы корпуса и параметров машины и равна изменению количества движения корпуса [4].

Во время посадки скорость корпуса резко изменяется (моменты посадки отмечены буквами  $A$  на рис. 1, в). Продолжительность цикла хода ударника во втором переходном режиме изменяется в больших пределах, так как в каждом цикле вследствие отхода корпуса меняет свою величину и длина хода ударника.

Значение усилия нажатия, определяемое нами через основные параметры молотка, для второго переходного режима равно

$$R_n = \frac{n}{60} [V\sqrt{2A_y m}(\kappa_0 + 1) + I_n] + \frac{n''}{60} m_k V_n (\kappa_k + 1), \text{ кг}, \quad (13)$$

где  $n$  — частота ударов ударника в минуту;

$n''$  — частота соударений корпуса с буртиком инструмента, уд/мин;

$V_n$  — скорость посадки корпуса, м/сек;

$m_k$  — масса корпуса, кг · сек<sup>2</sup>/м;

$\kappa_k$  — коэффициент отскока корпуса.

Для определения усилия нажатия по формуле (13), кроме основных параметров машины, необходимо знать скорость корпуса до и после посадок, а также их частоту. Эти характеристики находятся по виброграммам.

#### г) Предельно основной режим

При дальнейшем увеличении усилия нажатия учащаются посадки корпуса на ограничительный буртик. В предельно основном режиме они происходят в каждом цикле хода бойка. Амплитуда вибрации достигает максимума [2].

Геометрическая форма колебаний корпуса в предельно основном режиме качественно схожа с диаграммой пути ударника.

В начале режима амплитуда вибрации в различных циклах разная (рис. 1, з), затем колебания совершаются с одинаковой амплитудой (рис. 1, д). Усилие нажатия, которое необходимо приложить к рукоятке для получения предельно основного режима, вычисляется по формуле

$$R_n = \frac{n}{60} [V\sqrt{2A_y m}(\kappa_0 + 1) + I_n + m_k V_n (\kappa_k + 1)], \text{ кг}. \quad (14)$$

Скорость посадки корпуса на буртик  $V_n$  и коэффициент  $\kappa_k$  определяются по виброграммам, записанным на пленку.

Кроме этого  $V_n$  можно определять также по формуле, предложенной Б. В. Суднишниковым [7]:

$$V_n = \sqrt{\frac{2A}{m_k} R_n}, \text{ м/сек}, \quad (15)$$

где  $A$  — амплитуда вибрации в предельно основном режиме работы молотка, м.

Анализ виброграмм показывает, что в предельно основном режиме работы молотка движение его корпуса в сторону рукоятки начинается всегда в тот момент, когда сила давления воздуха на корпус станет больше усилия нажатия. При равенстве этих сил путь корпуса равен нулю. Время движения корпуса в предельно основном режиме равно продолжительности цикла хода ударника. При увеличении усилия нажатия на рукоятку молотка время движения корпуса в рассматриваемом режиме уменьшается. Подобные геометрические формы колебаний изучены Б. В. Суднишниковым [7] и Н. А. Клушиным [8]. Для рубильных и клепальных молотков при повышении силы нажатия геометрическая форма колебаний качественно изменяется (рис. 1, е). Этот режим работы молотка выделен нами особо и назван третьим переходным (рассматривается ниже).

Таким образом, несмотря на большое усилие нажатия, амплитуда вибрации молотка в предельно основном режиме больше, чем в плавающем. В известных нам работах советских и зарубежных авторов, посвя-

щенных исследованию вибрации ручных пневматических молотков (в большинстве случаев отбойных), указывается, что амплитуда вибрации с увеличением усилия нажатия постепенно уменьшается, т. е. амплитудно-силовая характеристика изменяется плавно, без перегибов. По нашему мнению, для отбойных молотков изменение амплитуды вибрации в функции усилия нажатия качественно, по-видимому, происходит так же, как и для исследованных нами молотков. В работе Н. А. Клушина [8] приводится следующий пример: размах колебаний корпуса молотка СМСП-5 в предельно основном режиме ( $R_n = 30 \text{ кг}$ ) составляет 7 мм, в плавающем ( $R_n = 15 \text{ кг}$ ) — 4 мм, то есть в 1,7 раза меньше, что подтверждает наши предположения.

#### д) Третий переходный режим

После предельно основного режима при увеличении усилия нажатия амплитуда вибрации снижается [2]. Меняется и форма виброграммы (рис. 1, е, ж, з). Корпус молотка осуществляет сложное движение сначала под действием давления сжатого воздуха, затем вследствие обратного удара инструмента. На виброграмме появляются соответственно два максимума (показаны цифрами 1 и 2, рис. 1, е, ж, з). Причем при постепенном увеличении усилия нажатия ордината первого максимума уменьшается, а второго — увеличивается (по сравнению с первым). В работе [3] показывается, что в этом случае амплитудно-силовая характеристика может иметь второй максимум. В третьем переходном режиме на корпус молотка действуют силы соударения с буртиком двоякого рода. Природа одних сил соударения нами уже рассмотрена. Это силы, действующие на корпус при посадках, происходящих во время обратного хода ударника, когда инструмент находится в покое, и, как правило, на некотором удалении от обрабатываемого материала.

Другими силами являются обратные удары инструмента. Величина их в первую очередь зависит от свойств обрабатываемых материалов, соотношения и свойств масс соударяющихся тел, а также от энергии удара. Обратные удары инструмента вызывают резкое изменение скорости движения корпуса, что, как правило, приводит к возрастанию амплитуды вибрации [3]. С точки зрения гигиенистов этот режим работы молотков опасен для работающих.

Величина усилия нажатия для третьего переходного режима определяется по выражению

$$R_n = \frac{n}{60} [V \sqrt{2A_y m} (\kappa_0 + 1) + I_n + m_k V_n (\kappa_k + 1) + \int_0^t F_{o,y} dt], \quad (16)$$

где  $F_{o,y}$  — сила обратного удара инструмента по корпусу молотка, кг  
 $t$  — время обратного удара, сек.

Судя по формам колебаний корпуса молотка, сила обратного удара зависит от расстояния, на котором корпус находится от обрабатываемого изделия к моменту соударения. После удара бойка инструмент под действием ударных сил и переданной ему энергии внедряется в обрабатываемый материал, отскакивает от него и движется в сторону корпуса. Остановка инструмента в крайнем заднем положении происходит вследствие соударения с корпусом и давления воздуха на торец хвостовика или вследствие только последнего фактора (во всех режимах, кроме третьего переходного).

Под действием давления воздуха инструмент вторично перемещается до соударения с обрабатываемым материалом и отскакивает от него в зависимости от свойств материала еще 1—2 раза.

Величина давления воздуха в передней полости, в свою очередь, также зависит от отхода корпуса. Давление тем меньше, чем меньше отход. Таким образом, сила обратного удара будет максимальной в случае наличия контакта между корпусом и буртиком перед ударом бойка по хвостовику инструмента (рис. 1, з). В работе [3] подсчитано, что сила обратного удара по корпусу при работе молотка КЕ-22 по стали равна 246 кг, при работе по дереву — 76 кг (при 5 атм).

**е) Режим работы, при котором колебания корпуса осуществляются от обратных ударов инструмента**

При увеличении усилия нажатия на рукоятку молотка свыше 32 кг колебания корпуса осуществляются только от обратных ударов инструмента. Геометрическая форма колебаний представлена на рис. 1, и, к. Усилие нажатия при этом режиме работы молотка компенсирует действие следующих сил:

$$R_n = \frac{n}{60} \left[ \sqrt{2A_y m} (\kappa_0 + 1) + I_n + \int_0^t F_{oy} dt \right] + R_k, \text{ кг}, \quad (17)$$

где  $R_k$  — сила контакта корпуса молотка с ограничительным буртиком инструмента, кг.

В приведенных формулах для определения усилия нажатия для каждого режима работы молотка не учитывались силы трения в направляющей буксе, а также вес шланга и реактивное действие выхлопной струи сжатого воздуха. Несмотря на указанные допущения, в большинстве случаев расчетные значения усилия нажатия совпадают с экспериментальными. Впервые взаимосвязь между усилием подачи и основными параметрами пневматической машины ударного действия была установлена О. Д. Алимовым [4]. На основании теоремы о количестве движения он пришел к выводу, что усилие нажатия компенсирует действие на машину ряда сил. В соответствии с этим О. Д. Алимовым были введены новые понятия, так называемые составляющие усилия подачи.

Первая составляющая  $R_1$  компенсирует действие на корпус молотка импульса от соударения поршня с буром. Вторая составляющая  $R_2$  компенсирует силы соударения корпуса с буртиком при посадках. В дальнейшем, развивая положения о составляющих усилия подачи, В. Ф. Горбуновым [9] была введена третья составляющая, величина которой определяется выражением (1).

В плавающем режиме работы машины усилие нажатия условно можно разделить на две составляющие — первую и третью; во втором переходном и предельно основном — на три: первую, вторую и третью. В третьем переходном режиме, кроме указанных сил, усилие нажатия компенсирует действие на корпус машины обратных ударов инструмента. Следовательно, появляется еще одна составляющая усилия нажатия — четвертая. Часть усилия нажатия, компенсирующая силы контакта, можно выделить как пятую составляющую.

Как видно из математических выражений для определения составляющих усилия нажатия, некоторые из них можно найти через основные параметры машины. Для определения других составляющих необходимы данные эксперимента. Аналитическим путем практически их нельзя определить.

Разделение величины усилия нажатия на составляющие позволяет провести анализ взаимозависимостей основных параметров машины при различных режимах работы с величиной усилия нажатия и наметить пути ее снижения. Усилие нажатия может быть значительно снижено

путем изменения формы диаграммы результирующей силы по методу Б. В. Суднишникова, уменьшения диаметра хвостовика инструмента до рациональных пределов, определяемых прочностью и коэффициентом передачи энергии, введением в конструкции машин виброгасящих устройств и т. д.

### Выводы

1. Амплитудно-силовая характеристика молотков, показывающая характер изменения амплитуды вибрации в зависимости от усилия нажатия, является сложной. Наличие перегибов на амплитудно-силовой зависимости объясняется тем, что при определенных условиях работы на корпус молотков действуют дополнительные силы, которые по своему характеру являются ударными. В предельно основном режиме такая сила возникает при соударении корпуса с ограничительным буртиком инструмента (во время посадки корпуса). В третьем переходном режиме ударными силами являются обратные удары инструмента по корпусу.

2. Силы соударения корпуса с буртиком инструмента по своим абсолютным величинам значительно превосходят силу нажатия (для определенных режимов), поэтому возрастание амплитуды вибрации происходит именно в те моменты, когда возникают эти силы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Бабуров, В. Ф. Горбунов, А. В. Триханов. Причины вибрации ручных пневматических молотков и способы борьбы с ней. Статья в данном сборнике.
2. В. Ф. Горбунов, В. И. Бабуров, Ю. А. Опарин, Л. С. Редутинский. Оценка вибрационных характеристик рубильно-клепальных молотков по санитарным нормам. Известия ТПИ, т. 129. Изд-во Томского университета, 1965.
3. В. Ф. Горбунов, В. И. Бабуров, Л. С. Редутинский, А. В. Триханов, Г. Г. Пестов. Исследование вибрации ручного пневматического молотка при работе по различным материалам. Горные машины и автоматика, ЦНИИТЭИ угля, № 56, Недра, 1964.
4. О. Д. Алимов. Взаимосвязь усилия подачи с основными параметрами рубильного молотка. Известия ТПИ, т. 108, Metallurgizdat, 1959.
5. А. М. Петреев. К теории рабочего цикла пневматических машин ударного действия. Сб. Математические методы в горном деле (материалы конференции) ч. 1, Новосибирск, 1963.
6. А. М. Петреев. О снижении отдачи ручных пневматических машин ударного действия путем совершенствования рабочего цикла. Известия СО АН СССР, серия технических наук, № 6, вып. 2, 1963.
7. Б. В. Суднишников. К теории отдачи ручных машин ударного действия. Новосибирск, 1953.
8. Н. А. Клущин. Пневматические молотки с новым циклом, снижающим отдачу. Кандидатская диссертация. Новосибирск, 1958.
9. В. Ф. Горбунов. К расчету минимальных усилий нажатия при работе ручными пневматическими молотками. Известия ТПИ, том 129. Издательство Томского университета, 1964.