

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ
РАБОТЫ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО БУРИЛЬНОГО МОЛОТКА
ПМ-508**

П. М. Алабужев, О. Д. Алимов, В. Ф. Горбунов, В. И. Копытов

Исследованиями режимов работы и рабочего процесса электрических и пневматических бурильных молотков [1—3] выявлен ряд вопросов, на которые нельзя было дать ответ без проведения экспериментального исследования динамики работы бурильных молотков. В данной работе делается попытка дать ответ на эти вопросы, а также объяснить характер изменения сил, действующих на корпус молотка. Это было достигнуто путем одновременной записи на фотопленку (с помощью соответствующих датчиков и шлейфового осциллографа) перемещений поршня, бура и корпуса молотка, изменения усилия между штоком пневмоподатчика и корпусом молотка, а также между корпусом молотка и буром, давления воздуха в передней и задней полостях цилиндра молотка.

Эксперименты проводились при бурении шпуров в роговике крепостью $f = 14 \div 18$ по шкале проф. М. М. Протсдьяконова.

Экспериментальная установка и методика проведения опытов

В основу методики проведения экспериментов была взята методика, изложенная в работе [4]. Бурильный молоток укреплялся на стенде, описанном в работе [5]. Усилие подачи молотка обеспечивалось пневматическим податчиком.

Для записи хода поршня в цилиндре молотка и хода корпуса молотка относительно породы применялись датчики реостатного типа (потенциометрические датчики [6]). Потенциометрический датчик для записи хода поршня прикрепляли к корпусу молотка при помощи специальной каретки, а подвижной контакт — к одному из концов стального стержня, который пропускали через отверстие в задней крышке и вторым концом укрепляли в поршне.

молотка. Возвратно-поступательное движение поршня через стержень передавалось подвижному контакту потенциометрического датчика.

Таким образом, при перемещении поршня в цилиндре молотка изменялось омическое сопротивление, а следовательно, и величина тока в электрической цепи потенциометрического датчика. Переменная составляющая тока, снимаемая с датчика с помощью шлейфового осциллографа, записывалась на фотопленке в виде кривой, изображающей во времени возвратно-поступательное движение поршня в цилиндре молотка.

Запись колебательного движения корпуса осуществлялась аналогично записи движения поршня. При этом реостат прикрепляли к направляющим податчика молотка, а подвижной контакт (ползунок) соединяли с корпусом молотка. При достаточно прочном скреплении направляющих податчиков и образца горной породы можно считать, что при записи перемещения корпуса молотка относительно направляющих податчика мы зафиксируем движение корпуса молотка относительно породы.

Запись движения бура также проводилась с помощью потенциометрического датчика. Подвижной контакт датчика прикрепляли непосредственно к буру. Реостат укрепляли на специальной втулке с шестигранным отверстием по размеру бура так, чтобы последний мог свободно перемещаться во втулке. Специальные ограничители, укрепленные на направляющих податчика, не позволяли втулке перемещаться вдоль бура. В то же время втулка могла совершать вращательное движение вместе с буром. Таким образом, имелась возможность записать движение бура относительно разрушаемой породы, так как направляющие податчика молотка, а следовательно, и ограничители втулки были неподвижны относительно породы.

Потенциометрический датчик представляет собой цилиндр из изоляционного материала (эбонит, сухое дерево), на который плотно намотана проволока. В наших экспериментах принималась константовая проволока диаметром 0,2 мм. Как показали эксперименты, этот провод достаточно стоек против истирания при движении по нему скользящего контакта.

Каждый датчик реостатного типа питался от отдельной аккумуляторной батареи, чтобы устранить взаимное влияние электрических цепей шлейфов.

Датчик для регистрации усилий, возникающих между корпусом молотка и буром, представлял собой проволочное сопротивление (тензометр) [4—6], наклеенное на металлическую балку, изогнутую в виде дуги. Балка одним концом прикреплялась к корпусу молотка, другим — упиралась в буртик бура. Хвостовик бура удлинялся на величину, равную вылету изогнутой балки.

Таким образом все усилия, возникающие между корпусом молотка и буртиком бура, передавались через балку, деформация

которой вызывала изменение омического сопротивления наклеенного тензомера, который представлял собой активный датчик, включенный в мостовую схему [6]. В качестве материала балки для наклейки тензомера была взята сталь марки ШХ15.

Датчик для регистрации усилия между штоком пневмоподатчика и корпусом молотка, которое мы условимся называть усилием подачи, представлял собой также проволочное сопротивление, наклеенное на консольную балку. Деформация балки вызывала изменение омического сопротивления наклеенного тензомера, также являвшегося активным датчиком мостовой схемы [6]. Один конец балки жестко прикрепляли к корпусу молотка, а свободный конец упирали в шток пневмоподатчика. Таким образом усилие пневмоподатчика на корпус молотка передавалось через консольную балку, которая была изготовлена из стали ШХ15.

Для записи диаграмм давления применялись также тензометры, наклеенные на мембрану, как описано в работе [4]. Собранный датчик давления укрепляли на корпусе молотка, в котором просверливали отверстие диаметром 6—8 мм. Размеры мембраны и корпуса датчика могут быть приняты различными в зависимости от базы датчика [6]. Нами применялись тензометры с базой 25 мм и сопротивлением 530 ом.

Для усиления сигналов, поступающих от датчиков при деформации соответствующих балок в процессе работы молотка, использовался трехканальный усилитель [4]. Запись процессов проводилась на киноплёнку с помощью восьмишлейфового осциллографа МПО-2.

Тарировка датчиков

Потенциометрическая схема для регистрации движений поршня, корпуса молотка и бура была составлена так, чтобы была прямо пропорциональная зависимость между изменением тока в цепи шлейфа и перемещением поршня (корпуса, бура). На осциллограммах переменная ордината кривой, характеризующей движение поршня во времени, определяла в некотором масштабе положение поршня относительно цилиндра молотка. Для выполнения условия линейной зависимости необходимо, чтобы омическое сопротивление цепи шлейфа было намного больше сопротивления в цепи датчика [4, 6].

Тарировка потенциометрического датчика производилась следующим образом. Перемещая ползунок по реостату через отрезки равной длины, т. е. передвигая поршень (корпус, бур) вручную от некоторого определенного положения, фиксировали отклонение линии шлейфа на экране осциллографа для каждого положения поршня. Замеряя величину отклонения шлейфа и зная величину перемещения поршня (корпуса, бура), строили тарировочный график (рис. 1).

Тарировка датчиков для регистрации усилий подачи, усилий между корпусом молотка и штоком пневмоподатчика и датчиков давления производилась при неработающем молотке.

Задавая ряд (от 15 до 155 кг через 15,5 кг) значений усилий подачи, на экране осциллографа получали отклонения линии шлейфа от нулевой отметки, соответствовавшей случаю, когда усилие подачи было равно нулю. Задавая определенное усилие подачи и измеряя отклонения линии шлейфа, строили тари-

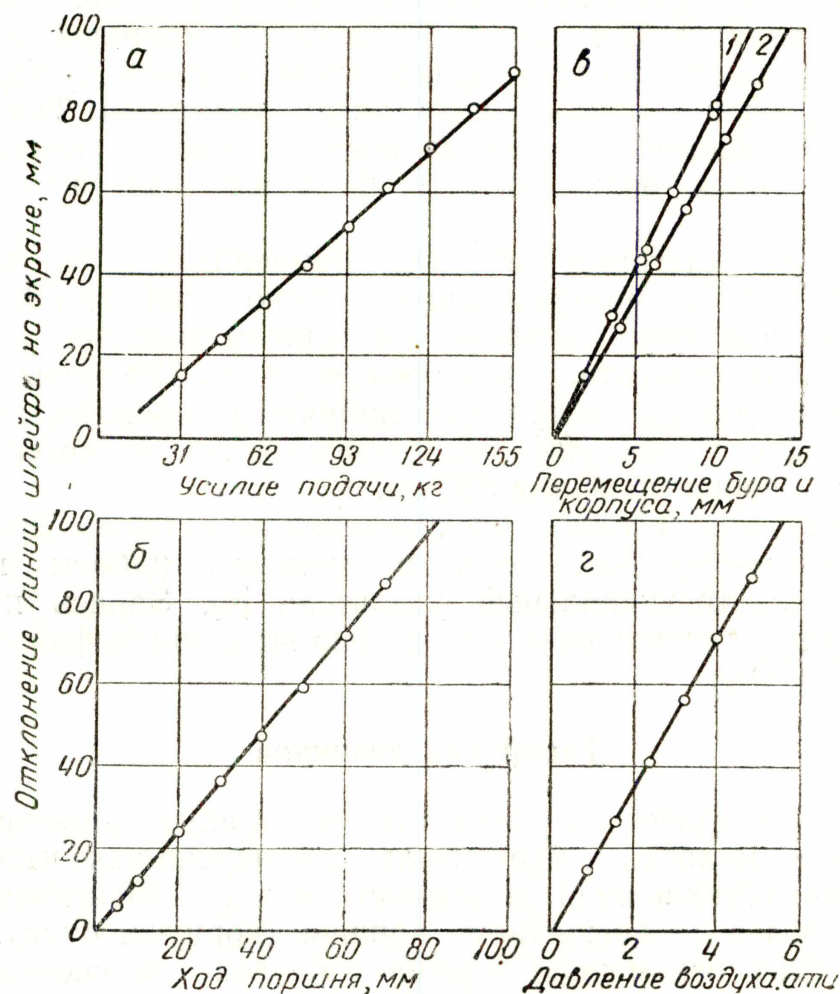


Рис. 1. Тарировочные графики усилия подачи (а), хода поршня (б), корпуса и бура (в) и давления воздуха (г) в цилиндре молотка:

1 — перемещение бура; 2 — перемещение корпуса.

ровочный график, по которому, зная ординату заснятой на пленке диаграммы, можно определить действительное значение усилия подачи (рис. 1). Из тарировочного графика видно, что при принятых нами параметрах схемы отклонение линии шлейфа в диапазоне усилий подачи от 15 до 150 кг было прямо пропорционально усилию подачи. При больших усилиях подачи линейность несколько нарушалась, однако в наших экспериментах максимальные усилия подачи не превосходили 130 кг.

Тарировка датчиков с целью проверки стабильности показаний проводилась до и после каждой серии опытов. Линейная зависимость между величиной усилия подачи и ординатой осциллограммы позволяет определить численное изменение усилия подачи в течение цикла движения корпуса, а также подсчитать величины импульсов рассматриваемых сил.

Усилие подачи (P_n) пневмоподатчика при известном давлении сжатого воздуха в сети подсчитывается по формуле

$$P_n = p_0 s \text{ кг},$$

где s — площадь поперечного сечения поршня пневмоподатчика, см^2 ;

p_0 — давление сжатого воздуха на единицу площади поршня пневмоподатчика, кг/см^2 .

Тарировка датчиков давления подробно описана нами ранее [4]. Максимальная относительная ошибка, получаемая при записях хода поршня, корпуса молотка и бура, а также усилий между штоком пневмоподатчика и корпусом молотка, подсчитанная по формулам [4, 6, 7], не превосходит 10—15 %

Результаты экспериментальных исследований

На рис. 2 приведены некоторые совмещенные осциллограммы, наиболее характерные для работы молотка в исследуемых режимах (давление воздуха в сети и усилие подачи). Бурение проводилось при давлении воздуха в сети 4, 5 и 6 *ати*, так как в основном при этих давлениях воздуха работают бурильные молотки на карьерах, в шахтах и рудниках. Для упрощения анализа осциллограмм каждая из кривых (рис. 2) имеет определенное обозначение.

Из приведенных осциллограмм можно сделать ряд выводов по таким вопросам, как взаимосвязь хода поршня и корпуса молотка, хода корпуса молотка и изменения усилия подачи, взаимосвязь хода корпуса молотка и хода бура, хода бура и изменения усилия между буром и корпусом в зависимости от давления воздуха в цилиндре молотка.

Взаимосвязь хода поршня и корпуса молотка за один цикл

После удара поршня по буру (рис. 2, точка *e*) корпус молотка (кривая II) продолжает немного двигаться в сторону податчика и достигает наибольшего отклонения через 0,002—0,004 сек. после удара (что соответствует 0,05—0,10 времени цикла), т. е. уже во время обратного хода поршня.

Говоря об отклонениях корпуса, мы подразумеваем его перемещения относительно породы в течение цикла, т. е. рассматриваем амплитуду колебаний.

Во время обратного хода поршня корпус идет вперед и достигает наибольшего переднего положения (за данный цикл) при крайнем заднем положении поршня в цилиндре молотка или при подходе поршня к этому положению. Такая взаимосвязь движения корпуса молотка и поршня характерна для всех исследуемых режимов (давления воздуха в сети 4, 5 и 6 *ати* и усилий подачи молотка на забой от 30 до 90 *кг*). Таким образом, в момент удара поршня по буру корпус молотка практически неподвижен. Следовательно, скорость движения поршня, определенная по диа-

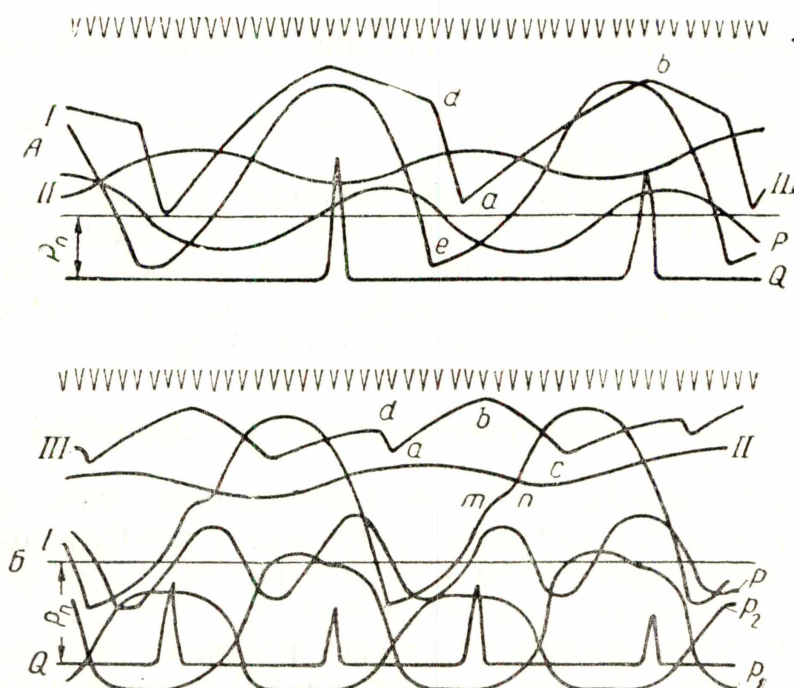


Рис. 2. Осциллограммы хода поршня (I) корпуса молотка (II), бура (III); изменения усилия P между штоком пневмоподатчика и корпусом молотка; изменения усилия Q между корпусом молотка и буром; изменения давления в задней p_1 и передней p_2 полостях цилиндра молотка:

А — малые усилия подачи $P_{п}$; Б — оптимальные усилия подачи $P_{п}$.

грамме перемещения поршня относительно корпуса молотка, в момент удара по буру может считаться определенной относительно направляющих податчика или разрушаемой породы.

Взаимосвязь хода корпуса молотка и изменения усилия между штоком податчика за один цикл

При рассмотрении взаимосвязи хода корпуса молотка и изменения подачи за один цикл следует одновременно рассматривать и положение поршня в цилиндре, так как в конечном сче-

те последнее является определяющим фактором изменения усилия за цикл от его среднего значения (P_n).

При анализе динамики работы молотка следует различать три зоны режимов бурения в зависимости от усилия подачи при данном давлении в сети [2, 5]. Первая зона — усилие подачи меньше оптимального. Вторая зона — усилие подачи равно оптимальному значению. Третья зона — усилие подачи больше оптимального при прочих одинаковых условиях.

1. При малых усилиях подачи P_n (рис. 2, А) поршень после удара по буру начинает ускоренно двигаться назад, поворачивая бур. Корпус, как установлено выше, с некоторым опозданием начинает двигаться вперед, как бы уходя от штока податчика. Вследствие этого усилие подачи (кривая P) падает ниже среднего значения P_n иногда до нуля. При некотором положении поршня в цилиндре скорость его начинает уменьшаться (перегиб кривой I при обратном ходе поршня). Вследствие этого скорость движения корпуса молотка вперед начинает также уменьшаться и шток податчика (весом 6 кг) набегает на корпус, что вызывает увеличение усилия подачи. Достигнув крайнего заднего положения, поршень начинает ускоренно двигаться вперед, что вызывает соответственное ускоренное движение корпуса молотка назад, а это, в свою очередь, вызывает увеличение усилия P (корпус «набегает» на шток податчика). Кривая изменения усилия подачи за цикл хода корпуса приблизительно представляется синусоидой с периодом, равным времени цикла.

2. Во втором случае, когда усилие подачи P_n равно оптимальному значению, величина усилия за цикл имеет два неравных пика (до $1,5 P_n$) и два спада усилия подачи (до $0,5 P_n$).

3. В третьем случае, когда усилие подачи P_n больше оптимального, усилие P за цикл имеет два почти равных пика и два спада. При этом наибольшее отклонение усилия P от среднего значения изменяется в пределах $0,3 \div 0,5 P_n$.

Изменение усилия подачи за цикл хода поршня во второй и третьей зоне режимов бурения можно представить синусоидой с периодом, равным половине периода цикла, и нулевой линией, совпадающей с линией P_n .

Таким образом, с увеличением среднего усилия подачи (P_n) уменьшаются максимальные отклонения усилия от его номинального значения.

При усилиях подачи P_n , несколько больше оптимальных, сказывается влияние контакта бура и корпуса на изменение усилия подачи в течение цикла. После удара поршня по буру (точка d , рис. 2, Б) и удара бура о породу (точка a) последний отскакивает от породы на 2—2,5 мм и ударяется о корпус (точка b) в тот момент, когда поршень совершает обратный ход и начинает вращать бур. Корпус молотка в это время из крайнего заднего положения начинает двигаться вперед, прижимая бур к породе, в результате чего появляется дополнительное сопротивление вра-

щению бура. Эти силы сопротивления оказывают влияние на скорость движения поршня при обратном ходе, что выражается изменением плавности кривой 1 хода поршня (участок $m-n$, рис. 2 Б)*. Скорость поршня на этом участке снижается, что вызывает уменьшение скорости движения корпуса. Уменьшению скорости движения молотка в этот момент способствует и удар бура по корпусу после отскока от породы. В результате некоторого торможения движения корпуса молотка шток податчика «набегает» на корпус и усилие подачи резко возрастает — первый пик.

В дальнейшем скорость поршня снова растет, что вызывает увеличение скорости движения корпуса, который теперь «уходит» от штока, вследствие чего усилие резко падает до $0,5 P_n$ при крайнем переднем положении корпуса молотка. Следующее движение корпуса молотка назад опять вызывает увеличение усилия подачи — второй пик. После того, как движение поршня при прямом ходе, а следовательно, и корпуса становится равномерным, усилие подачи снижается. В момент удара поршня по буру корпус молотка, почти достигнув крайнего заднего положения, останавливается и усилие подачи становится равным P_n . После остановки корпуса молотка шток податчика еще продолжает какое-то время двигаться назад по инерции, «уходя» от корпуса, что вызывает уменьшение усилия подачи ниже P_n и т. д.

Взаимосвязь хода корпуса молотка и хода бура

При работе молотка почти на всех исследуемых режимах (давление в сети 4—6 *ати* и усилиях подачи от 30 до 90 *кг*) бур, после удара по нему поршнем, ударяется о породу и отскакивает от нее. Величина отскока в наших опытах изменялась от 2 *мм* (большие усилия подачи) до 6—12 *мм* (малые усилия подачи).

При малых усилиях подачи корпус молотка относительно направляющих податчика, кроме основных колебаний, с частотой, равной числу ударов, совершает дополнительные колебания с периодом примерно в 8—10 раз больше периода основных колебаний. Амплитуды этих дополнительных колебаний достигают 10—15 *мм* и более. На этот сложный характер колебания корпуса молотка в процессе работы указывается в работах [2, 3, 5] в которых максимальные амплитуды этих дополнительных колебаний называют «отходом корпуса» от разрушаемой породы. Характер движения бура зависит от величины этого отхода корпуса.

После удара поршня по буру (точка d рис. 2, А) последний движется к породе (участок $d-a$) и ударяется об нее (точка a).

* Впервые на такую особенность кривой хода поршня указывается в работе [3].

Ударившись о породу, бур отскакивает от нее и ударяется о корпус молотка (точка *b*), отскакивает от корпуса и опять движется к породе.

Если при этом отход корпуса молотка от породы велик, то бур останавливается на некотором расстоянии от породы (примерно 3—5 мм). Следующий удар поршня производится по буру, который в большинстве случаев при бурении горизонтальных шпуров не касается породы. Если отхода корпуса от ограничительного буртика бура нет, то бур в момент удара по нему поршнем касается породы. Этот случай повторяется через 3—10 циклов (ударов) [3].

При усилиях подачи, равных оптимальным и больших, отход корпуса от буртика бура невелик. Вследствие этого характер движения бура в промежутке времени между ударами по нему поршнем будет иной, чем при малых усилиях подачи. После удара поршнем (точка *d*, рис. 2, Б) бур с некоторой скоростью ударяется о породу (точка *a*), отскакивает от нее (до 3 мм), ударяется о корпус молотка (точка *b*), отскакивает от корпуса и снова ударяется о породу (точка *c*). После чего бур, отскочив от породы, останавливается на некотором расстоянии от нее (1—2 мм).

При очень больших усилиях подачи бур к моменту удара по нему поршнем прижат к породе с некоторым усилием, так как амплитуда колебания корпуса молотка мала и отхода корпуса от породы нет [3]. Таким образом, в момент удара поршня по буру можно принять, что скорость бура равна нулю.

Взаимосвязь хода бура и изменения усилия между буром и корпусом молотка

Во время отскока бура от породы происходит довольно сильный удар буртика бура о корпус молотка. Соударение бура с корпусом происходит в большинстве случаев в момент максимального отхода бура от забоя, о чем свидетельствует резкое возрастание усилия между корпусом молотка и буртиком бура (кривая *Q*, рис. 2).

При малых усилиях подачи удар бура о корпус молотка соответствует моменту, когда корпус начинает движение назад (рис. 2, А).

При оптимальных и больших усилиях подачи, помимо первого пика, соответствующего «чистому» удару по корпусу молотка, появляется второй, возникающий в результате «набегания» корпуса молотка на буртик бура и встречного движения бура при его отскоке от породы (рис. 2, Б).

ВЫВОДЫ

При рассмотрении вопроса о характере движения бура за один цикл, а также о закономерностях изменения усилия подачи молотка на забой следует выделять три зоны режимов бурения в зависимости от величины среднего значения усилия подачи: ма-

лые усилия, оптимальные и близкие к ним и большие усилия, когда молоток работает неустойчиво.

При малых усилиях подачи бур после удара по нему поршня движется к породе и ударяется об нее. Затем отскакивает от породы и сильно ударяется о корпус молотка. После этого бур отскакивает от корпуса и останавливается на некотором расстоянии от породы. Если величина отхода корпуса от забоя велика, то бур может не достигнуть корпуса во время первого отскока от породы.

При оптимальных усилиях подачи и выше (вторая и третья зоны бурения) бур в течение одного цикла хода поршня совершает два удара о породу и два удара по корпусу молотка. Второго удара бура по корпусу может и не быть, что зависит от условий разрушения породы (удаление из шпура пыли и крупинки породы).

В момент удара поршня по буру последний во всех трех зонах бурения является свободным, практически неподвижным стержнем, находящимся на некотором расстоянии от породы или касающимся ее. Корпус молотка в момент удара поршня по буру можно считать неподвижным относительно разрушаемой породы. Следовательно, скорость движения поршня, определяемая по диаграмме его хода, в момент удара по буру может считаться определенной относительно горной породы.

Характер изменения усилия подачи за один цикл зависит от величины среднего усилия подачи молотка на забой и массы штока пневмоподатчика. При малых усилиях подачи P_n во время обратного хода поршня усилие подачи падает почти до нуля. Затем при прямом ходе поршня усилие подачи возрастает по сравнению с его средним значением за цикл (рис. 2, А). Кривая P , характеризующая изменение усилия подачи, представляет почти синусоиду периода, равного периоду цикла. Площадь импульса за цикл, ограниченная отрезком прямой P_n , равна площади импульса, ограниченной линией P .

При увеличении среднего усилия подачи во второй и третьей зоне режимов бурения характер изменения усилия подачи за цикл несколько иной: во-первых, уменьшается величина отклонения усилия подачи от среднего значения до $\pm 0,5 P_n$; во-вторых, за один цикл усилие подачи два раза достигает определенного максимума и два раза минимума (рис. 2, Б). Кривая P представляет синусоиду периода, равного половине времени цикла.

Это явление можно объяснить следующим фактором. Рассматривая корпус молотка и поршень в нем как свободную систему, мы можем на основании теоремы теоретической механики о сохранении центра масс системы утверждать, что чем большие перемещения совершает поршень в цилиндре молотка, тем большие перемещения должен делать и корпус молотка. При оптимальных и больших усилиях подачи перемещения поршня в цилиндре молотка будут наименьшими. Поэтому динамическое

взаимодействие между штоком пневмоподатчика и корпусом молотка уменьшается. Действие же ударов бура по корпусу молотка при отскоке его от породы способствует более частому изменению усилия подачи в течение цикла.

ЛИТЕРАТУРА

1. П. М. Алабужев. Исследование рабочего процесса электропневматических машин ударного действия. Докторская диссертация, Томск, ТПИ, 1954.
2. О. Д. Алимов. Исследование механизма разрушения горных пород при ударно-вращательном бурении и исходных параметров бурильных молотков. Кандидатская диссертация, Томск, ТПИ, 1953.
3. О. Д. Алимов, В. Ф. Горбунов. Некоторые результаты исследования пневматического бурильного молотка ОМ-506. Известия ТПИ, т. 88, 1956.
4. О. Д. Алимов, В. Ф. Горбунов. Методика экспериментального исследования рабочего процесса пневматических бурильных молотков. Известия ТПИ, т. 106, Металлургиздат, Свердловск, 1958.
5. О. Д. Алимов, И. Г. Басов, В. Ф. Горбунов. Методика лабораторного исследования влияния усилия подачи на скорость бурения пневматическими бурильными молотками. Известия ТПИ, т. 88, 1956.
6. И. А. Раевский. Методы экспериментального исследования механических параметров машин. Изд. АН СССР, 1952.
7. К. П. Яковлев. Математическая обработка результатов измерений. ГГТИ, 1950.