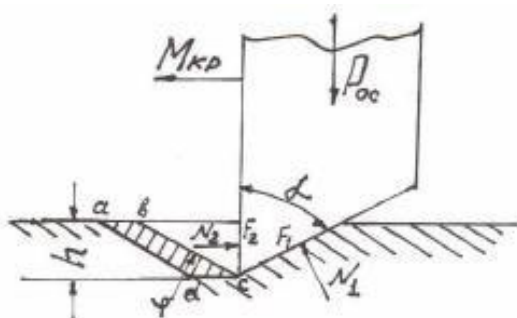


## ВЫБОР СПОСОБА РАЗРУШЕНИЯ И БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ БУРЕНИЯ В ПОРОДАХ РАЗЛИЧНОЙ КРЕПОСТИ

*К.т.н., доц., С.В. Кононыхин, соискатель А.Ю. Грицаенко, учащийся МОУ № 124 г. Донецка О.Е. Ляхов, ДонНТУ, г. Донецк*

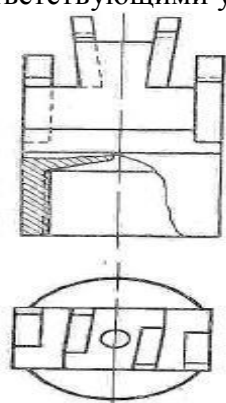
Самый простой и надёжный способ разрушения горных пород при бурении шпуров и скважин является бурение горных пород невысокой крепости режущим буровым инструментом. Это жесткий буровой инструмент создаёт режущие нагрузки в направлении перпендикулярном усилию подачи и в направлении его вращения.

Резец под действием осевого усилия движется по винтовой линии. При этом виде бурения порода разрушается под действием осевого давления  $P_{ос}$  и крутящего момента  $M_{кр}$  (рис. 2.4). Передняя грань резца сминает породу, когда образуется ядро смятия на площади действия силы  $F_2$ .

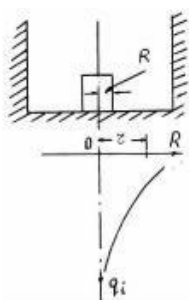


**Рис. 2.4. Формирование усилия резания при вращательном бурении.**

В породах пластичных (твердые глины, суглинки и др.) процесс разрушения носит характер плавного срезания стружки определенной толщины  $h$ . Разрушение относительно хрупких, но не крепких пород резовым инструментом имеет характер периодических сколов частиц достаточно больших размеров с резкими колебательными усилиями на лезвии резца. Взаимоотношения характера разрушения и величины осевого давления выражается в поверхностном или объемном разрушении. При малых нагрузках с низким удельным давлением меньше критического сопротивления породы вдавливанию, разрушение происходит вследствие поверхностного износа резца под влиянием сил трения. С увеличением осевого давления абразивный износ уменьшается и наблюдается соответствующий переход к объемному разрушению. Усилие на лезвии и потребляемая мощность растут до максимума в результате происходит скол по **abcd** (рис. 2.4), что ведет к спаду сопротивления породы и потребляемой мощности. При этом виде бурения, очевидно, что толщина стружки  $h$  прямо пропорциональна осевой нагрузке и, следовательно, уровню объемного разрушения с соответствующими удельными энергозатратами.



**Рис. 2.5. Коронка крупного скола.**



**Рис. 2.6. Схема к расчету усилий резания для коронок крупного скола.**

Одной из модификаций вращательного бурения в породах крепостью до 12, является так называемый вариант применения резцов крупного скола, в свое время разработанного в Киргизии Ю.Н. Смирновым (рис. 2.5).

Резец конструктивно выполнен с прерывистоступенчатой режущей кромкой, образующей в процессе бурения три плоскости обнажения. Схема разрушения горных пород такими резцами основана на использовании неоднородностей напряженного состояния породы, снижении роли пластических деформаций и повышении роли хрупких, а также частичного перевода напряжений сжатия

в область напряжений сдвига.

Механика разрушения аналогична рассмотренной ранее. Однако здесь имеются свои особенности. В частности, известно, что наиболее трудно разрушаемыми участками

являются центр и периферия скважины (рис. 2.6). Удельное контактное сопротивление породы (давление на лезвие резца) возрастает от периферии к центру по гиперболе:

$$q_i = \frac{2R-1}{2r-1} \cdot q_n, \quad (2.10)$$

где  $q_i$  и  $q_n$  - удельные давления породы на рассматриваемый периферийный участок режущей кромки лезвия;  $R$  и  $r$  - кратчайшее расстояние от оси резца до рассматриваемой точки.

Если сравнить картину в коронках с рассечкой по центру шириной «в» и аналогичную без рассечки (сплошную), то при бурении коронкой с центральными передовыми резцами (с рассечкой) средний диаметр шлама  $d_{ср}$  более крупный, а это значит что энергозатраты ниже. Уменьшение удельной реакции породы в центре способствует увеличению глубины внедрения резца:

$$h_p = \frac{1+k}{1-k} \cdot h_0, \quad (2.11)$$

где  $h_p$  и  $h_0$  - соответственно глубина внедрения в породу резца с рассечкой и без нее при повороте на один оборот;

$K$  - коэффициент отношения диаметра рассечки к диаметру резца, т.е.:

$$k = \frac{b}{2R}. \quad (2.12)$$

Удельное контактное давление выражается как:

$$q = \frac{P(1+k)}{4r \cdot a(1-k)}, \quad (2.13)$$

где  $P$  - осевое усилие;  $a$  - толщина резца.

Если  $r = kR$ , то:

$$q = \frac{P(1+k)}{4a \cdot R \cdot k(1-k)}. \quad (2.14)$$

Удельное тангенциальное давление составляет часть общего, т.е.:

$$q_\tau = \frac{f_{\tau p} P(1+k)}{2m \cdot h \cdot R(1-k) \cdot k} + C, \quad (2.15)$$

где  $f_{\tau p}$  - коэффициент трения;  $m$  - соотношение части слоя породы срезаемого резцом к его общей толщине;

$C$  - сцепление.

Последнее уравнение можно минимизировать для определенных условий, а именно, подбором размера рассечки, т.е. величины «к» при условии минимального  $q_\tau$ . Это условие выполняется при  $k = 0,415$  или при диаметре рассечки  $d = 0,83R$ . Для резцов диаметром 42 мм диаметр рассечки составляет 17,5 мм, а резцы будут иметь ширину не менее 5 мм для основной режущей кромки. Коронки крупного скола были испытаны при осевом давлении 1000-1100 кг при скорости вращения бура 140-290 об/мин. Эффект объемного разрушения подтверждается минимумом удельных затрат энергии, составившей 0,130 Вт/см<sup>3</sup>, который оказался в 25-30 раз ниже, чем при ударно-поворотном способе бурения в тех же породах.

2. Ударами в горной породе возникают два состояния напряженности относительно плоскости параллельной лезвию долота: симметричное - при зависимом вращении и асимметричное со сложным напряженным состоянием при независимом вращении за счет наложения сжимающих и сдвиговых напряжений. В целом величина напряжений зависит от угла заточки и степени изношенности лезвия.

При уменьшении диаметра скважин напряжения интенсивно возрастают по углам, а в средней части падают (рис. 2.1).

По мере углубления инструмента в шпур или скважину сжимающие напряжения по углам падают, а в их стенках возникают растягивающие напряжения, имеющие максимум также по углам. Под лезвием образуется ядро уплотнения и формируется выкол породы, при этом контурные напряжения, будучи максимальными на краю лезвия, несколько снижаются

и снова возрастают с приближением к выколу. Эти напряжения вызывают образование трещин и разрушение стенок скважины, поэтому она становится несколько больше диаметра инструмента.

Роль ядра уплотнения состоит в том, что в процессе его образования за счет деформации передается давление на периферийную часть массива и по обе стороны от лезвия. Ядро уплотнения образуется при первом ударе, а также при наличии предварительного выкола, в месте соседним с ним, играющим роль новой обнаженной поверхности. В этом случае ядро теряет свою симметрию с появлением наклона в сторону массива (рис. 2.1б). Максимальные скалывающие напряжения концентрируются со стороны массива (рис. 2.1в), благодаря чему и происходит скол породы в сторону предварительного выкола. Воздействующие усилия экспоненциально снижаются с удалением от выкола, они в свою очередь зависят от его глубины  $h$ .

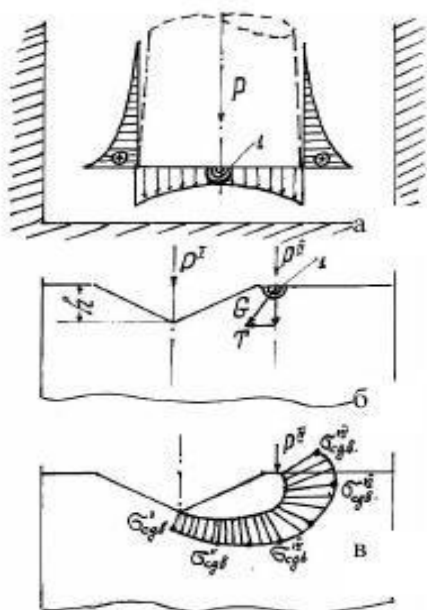


Рис. 2.1. Механизм разрушения и распределение усилий на забое скважины при ударно-поворотном бурении.

В зависимости от расстояния от центра первого выкола до следующего центра ядра уплотнения, находится уровень напряжений, и как показали эксперименты Л.Г. Грабчака и С.А. Брылова, при расстоянии, равном глубине выкола, наблюдаются максимальные напряжения сдвига. Это значит, что для данной крепости породы будет наблюдаться максимальный кусок разрушенной породы. Отсюда следует, что необходим точный расчет угла поворота бура для достижения объемного разрушения, для которого характерны минимальные удельные энергозатраты.

Кратковременные импульсные ударные нагрузки можно характеризовать амплитудой, продолжительностью и формой импульса. В работах К.И. Иванова и В.Д. Андреева раскрываются дополнительные детали механизма разрушения породы при бурении ударным способом при анализе формы ударного импульса. Форма изменялась за счет скорости удара и длины бойка при нанесении их по буру длиной 3 м с долотчатой коронкой на конце, установленной на гладкую поверхность различных по крепости пород, а также и в случае их

шероховатой поверхности. Ими установлено:

1. Объем разрушенной породы, приходящийся на один удар в 3 раза выше при шероховатой поверхности, чем при гладкой.
2. Энергоемкость разрушения ниже в 2,5-3 раза для шероховатой поверхности.
3. Первоначально отраженный от породы импульс растяжения содержит до 50% энергии, в то время как при разрушении гладкой поверхности - не более 15%.



Рис. 2.2. Формирование падающего и отраженного импульсов при ударном бурении.

4. Максимальная амплитуда первоначально отраженного импульса растяжения доходит до 87% от начального. Последние два вывода свидетельствуют о том, что в случае прижатого к забою бурового става, характерного для ударновращательного и вращательно-ударного бурения возможны значительные разрушения за счет отраженного (рис. 2.2) импульса, генерирующего растягивающие

напряжения в породе.

Расчеты удельной энергоемкости разрушения при единичном ударе, основанные на учете общей энергии, подводимой к штанге и объема разрушения, не давали реальной картины процесса. Дело в том, что не вся подводенная энергия передается от штанги к породе, т.е. необходимо определение коэффициента передачи энергии.

Коэффициент передачи энергии в породе определяется как:

$$\eta = \frac{W_H - W_0}{W_H}, \quad (2.8)$$

где  $W_H$  и  $W_0$  - количество энергии в начальном и отраженном импульсе.

Энергия импульса определяется величиной амплитуды напряжений, снятой с осциллограммы:

$$W = \frac{c \cdot S}{E} \int_{t_0}^{t_1} \sigma^2(t) dt, \quad 9)$$

где  $c$  - скорость звука в штанге;

$S$  - сечение штанги;

$E$  - модуль упругости;

$\sigma$  - напряжение.

Начальный (падающий) импульс состоит, судя по осциллограмме, из нескольких сглаженных ступеней, отраженный — из двух частей этапа растяжения и сжатия. На последнюю часть накладывается вторично отраженная составляющая от ударного конца штанги обратного импульса. Наблюдаемые три пика и последовательные спады усилия объясняются тремя циклами разрушения породы.

Первый цикл разрушения происходит при малом усилии и направлен на разрушение неровностей поверхности забоя, т.е. внедрение лезвия мало. После прохождения коронкой области смятия, усилия возрастают, а скорость внедрения падает. Это момент начала разрушения второго цикла и роста скорости внедрения. Следующий относительный максимум усилия не сопровождается разрушением, совпадает с переходом через нуль, т.е. имеем упругое восстановление породы.

Расчет энергии отраженного импульса показал, что она может колебаться от 19 до 65% от начальной, что зависит от свойств породы.

При бурении на небольшую глубину сформированный у ударного конца штанги импульс почти полностью передается породе. При длинном буровом ставе потери энергии существенны. Экспериментами К.П. Иванова и В.Д. Андреева установлено, что чем больше энергия удара, тем выше коэффициент передачи энергии, это с успехом используется в конструкции станков вращательноударного бурения Атлас Копко и других фирм.

При анализе связи удельной энергоемкости разрушения с общей энергией импульса удара при различных скоростях нагружения становится очевидным, что одной и той же энергии удара соответствуют два значения скорости. Обычно более высоким скоростям соответствуют более высокие значения удельной энергоемкости с разницей в 20-30%. Следовательно, при выборе величины энергии удара преимущество нужно отдавать массе, а не скорости, так как увеличение скорости приводит к росту инерционных сопротивлений породы, что увеличивает энергоемкость процесса разрушения. Повышение массы бойка обуславливает снижение скорости удара и, значит, повышает время его воздействия на породу, т.е. структура удара, построенная за счет увеличения массы более рациональна.

Забойные процессы при ударно-вращательном и вращательноударном бурении аналогичны описанным выше, с той лишь разницей, что в первом случае пневмоударник, всегда работающий у забоя, передает почти постоянную энергию удара коронке, в то время как во втором - она снижается с увеличением длины штанг.

Оба эти способа сочетают в себе элементы вращательного и ударного бурения. Внедрение лезвия бура в породу происходит под действием осевого усилия в сочетании с осевым же ударным импульсом, приложенным к непрерывно вращающемуся буровому стволу. Постоянный, плотный контакт коронки за счет большого усилия с породой обеспечивает снижение отраженной части импульса и, следовательно, более эффективное использование энергии начального импульса. Одновременно повышается доля крутящего момента в общем процессе разрушения породы.

Процесс разрушения при этих способах бурения протекает по-разному в зависимости от крепости пород. Для пород средней крепости осевое усилие должно быть достаточным для вдавливания лезвий в породу, а вращающий момент достаточным для среза гребешков породы между смежными ударами. Ударный импульс в данном случае носит вспомогательный характер, способствующий внедрению на большую глубину. Эти обстоятельства обеспечивают выход более крупной буровой мелочи и, следовательно, меньшую суммарную величину вновь образованной поверхности и снижение удельных энергозатрат.

При бурении крепких пород разрушение происходит в основном за счет ударной нагрузки. Осевое усилие должно обеспечивать постоянный контакт бура и породы и создание в ней напряженного состояния. С увеличением крепости пород должна расти энергия единичного удара и их число на один оборот бура.

Бурение указанными способами в породах высокой крепости обусловило применение штыревых долот, армированных зубками твердого сплава с малым вылетом, при которых возможно использование в полной мере ударного импульса для разрушения забоя скважины.

3. Разрушение породы при шарошечном бурении происходит в результате перекатывания зубьев шарошек по забою скважины, которые наносят удары по породе.

В момент касания зуба осевое усилие передается на породу соседними зубьями, а также конусом шарошки через продукты разрушения. По мере перехода зуба (рис. 2.3) в вертикальное положение на него будет действовать почти линейно возрастающая сила  $P_1$ , направленная вертикально вверх и находящаяся на расстоянии  $X$  от оси вращения. В это время сила, действующая на зуб  $B$  будет снижаться с прекращением разрушения породы.

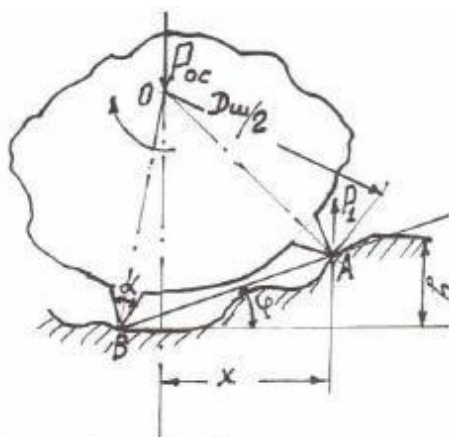


Рис. 2.3. Передача усилий на забой скважины при шарошечном бурении.

Механизм разрушения породы при шарошечном бурении является ударным, а сами станки по кинематике являются вращательными. Внедрение в породу зуба долота под действием осевого усилия обуславливает возникновение участков породы с разным состоянием. Там, где зуб непосредственно прилегает к ранее пораженной зоне, порода тонко измельчена, она передает неразрушенной части породы второго участка (рис. 2.3) нормальные напряжения. При скольжении по забою, вследствие того, что глубина разрушения породы всегда больше глубины внедрения зуба, он не производит дополнительного разрушения, и лишь способствует очищению забоя от продуктов разрушения. Порода во второй части из-за низкого уровня напряжений не разрушилась, поскольку деформации развивались не полностью, не достигнув критических значений.

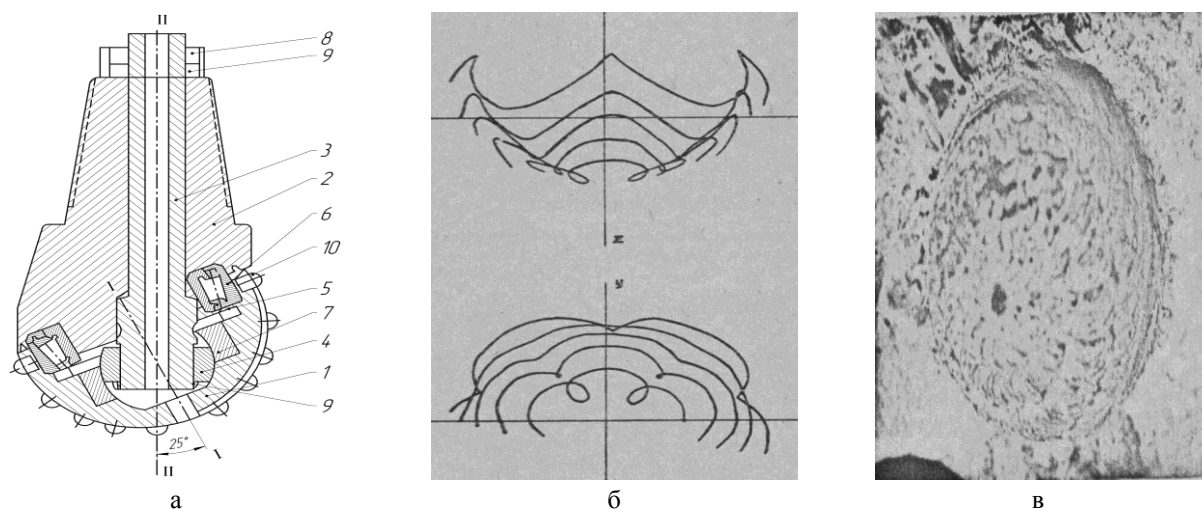
Средний размер продуктов разрушения (шлама) зависит от числа оборотов бурового става и величины вылета зубков относительно тела шарошки, а также конструктивных особенностей шарошки и осевого давления. Все режимные параметры бурения определяют общие и удельные затраты энергии в соответствии с известными законами дробления.

4. Буровые машины с ударным исполнительным органом аналогичны машинам, реализующим шарошечное бурение, так как в обоих случаях горная порода в забое скважины разрушается ударным способом. Различие в том, что при ударном способе



бурения ударный импульс формируется в машине ударного действия, а затем передаётся с потерями энергии по штанге и искажениями на забой шпура, или скважины. При шарошечном бурении ударное действие породоразрушающего зубка на забой формируется в самом забое при перекачивании зубчатого венца шарошки по забою, а к буровой машине по штанге доходит только отраженный импульс. В этом случае подающая часть бурового станка шарошечного бурения должна или гасить отраженные ударные импульсы, или противодействовать им путём наложения ударных импульсов на усилие подачи, что исследовалось в работе Харлашкина К.Н. [1].

Разработано одношарошечное долото с вертикальной цапфой, которое позволяет передавать осевое усилие через его корпус непосредственно на шарошку (рис.1а). Твердосплавные зубки долота во время движения шарошки совершают сложные траектории при перекачивании по забою со скольжением, которое возрастает по мере удаления зубчатого венца от точки пересечения осей долота и шарошки и венца перекачивания (рис.1б). Фотография скважины после бурения в известняке с оставленными на забое следами зубков подтверждает правильность рассчитанных траекторий (рис.1в).



**Рис.6. - Одношарошечное долото с вертикальной цапфой:**

а) конструкция долота, б) траектории движения зубков (вид сбоку и сверху), в) фото забоя скважины.

Результаты сравнения показателей бурения одношарошечным долотом к показателям бурения трёхшарошечным долотом показаны в таблице 1 и таблице 2:

$$(K1= V_{\text{одношар.}} / V_{\text{Трёхшар.}} ; K2= \mathcal{E}_{\text{одношар.}} / \mathcal{E}_{\text{Трёхшар.}} ; K3= S^2_{\text{одношар.}} / S^2_{\text{Трёхшар.}})$$

**Таблица 1**

	F, кН	ω, рад/с	X <sub>1</sub> , (F)	X <sub>2</sub> , (ω)	Одношарошечное долото, ОДВ-76					Трёхшарошечное долото, Ш-76				
					V1, м/мин	V2, м/мин	Э <sub>1</sub> , мДж/м	Э <sub>2</sub> , мДж/м	S <sub>1</sub> <sup>2</sup> , Н <sup>2</sup>	V1, м/мин	V2, м/мин	Э <sub>1</sub> , мДж/м	Э <sub>2</sub> , мДж/м	S <sub>1</sub> <sup>2</sup> , Н <sup>2</sup>
1	26	10	-1	-1	0,100	0,068	2,03	3,00	924	0,048	0,053	3,78	3,41	2480
2	26	20	-1	0	0,081	0,070	2,98	2,75	519	0,079	0,083	3,63	3,66	6570
3	26	30	-1	+1	0,153	0,117	2,23	2,92	359	0,117	0,110	4,04	4,60	15400
4	43	10	0	-1	0,115	<b>0,125</b>	2,52	2,72	571	0,067	0,057	5,04	5,49	700
5	43	20	0	0	0,214	0,236	2,10	2,67	453	0,081	0,082	5,00	5,04	1184
6	43	30	0	+1	0,364	0,328	1,73	1,92	437	0,144	0,147	3,90	3,83	11100
7	60	10	+1	-1	0,150	0,128	3,36	3,46	594	0,083	0,070	4,04	4,52	5500
8	60	20	+1	0	0,217	0,276	2,32	1,85	531	0,125	0,129	3,90	4,36	22100
9	60	30	+1	+1	0,444	0,300	1,45	1,40	468	0,163	0,160	4,49	4,31	2255

Таблица 2

№	F, кН	ω, рад/с	X <sub>1</sub> , (F)	X <sub>2</sub> , (ω)	Одношарошечное долото, ОДВ-76			Трёхшарошечное долото, Ш-76		
					V <sub>1</sub> , м/мин	Э <sub>1</sub> , мДж/м	S <sub>1</sub> <sup>2</sup> , Н <sup>2</sup>	V <sub>1</sub> , м/мин	Э <sub>1</sub> , мДж/м	S <sub>1</sub> <sup>2</sup> , Н <sup>2</sup>
1	26	10	-1	-1	0,084	2,512	924	0,0505	3,595	2480
2	26	20	-1	0	0,075	2,865	519	0,0810	3,645	6570
3	26	30	-1	+1	0,135	2,575	359	0,1135	4,320	15400
4	43	10	0	-1	0,120	2,620	571	0,0620	5,265	700
5	43	20	0	0	0,225	2,385	453	0,0815	5,020	1184
6	43	30	0	+1	0,346	1,825	437	0,1455	3,865	11100
7	60	10	+1	-1	0,139	3,410	594	0,0765	4,280	5500
8	60	20	+1	0	0,146	2,085	531	0,1270	4,130	22100
9	60	30	+1	+1	0,372	1,425	468	0,1615	4,400	2255
Σ -сумма показателей					1,642	21,70	4856	0,899	38,52	67289
Средние показатели					0,1824	2,411	539,5	0,0988	4,28	7476,5
K1= Отнош. Показ. Оdn. /Трёхш.					1,846	0563	0,072			
K2= Отнош. Показ. Трёхш. \ Оdn.								0,542	1,775	13,86

$$K1_1 = V_{\text{одношар.}} / V_{\text{Трёхшар.}} = 0,18224 / 0,0988 = 1,846 ;$$

$$K1_2 = Э_{\text{одношар.}} / Э_{\text{Трёхшар.}} = 2,411 / 4,28 = 0,563 ;$$

$$K1_3 = S^2_{\text{одношар.}} / S^2_{\text{Трёхшар.}} = 539,5 / 7476,5 = 0,072$$

$$K2_1 = V_{\text{одношар.}} / V_{\text{Трёхшар.}} = 0,18224 / 0,0988 = 1,846 ;$$

$$K2_2 = Э_{\text{одношар.}} / Э_{\text{Трёхшар.}} = 2,411 / 4,28 = 0,563 ;$$

$$K2_3 = S^2_{\text{одношар.}} / S^2_{\text{Трёхшар.}} = 539,5 / 7476,5 = 0,072$$

### Библиографический список:

1. А. с. № 859 588 СССР. Одношарошечное долото / Харлашкин К.Н., Кононыхин С.В., Манакин А.П., [и др.]. Опубл. 1981. Бюлл. № 32.

2. Харлашкин К.Н. Исследование влияния конструктивных параметров одношарошечных долот на кинематику шарошки / К.Н. Харлашкин, С.В. Кононыхин // Сборник научных трудов "Горные, строительные и дорожные машины" - К.: Изд - во "Техника", 1981. - № 32. - С. 55 - 60.

3. Кононихин С.В. Исследование траекторий движения зубков одношарошечного долота с вертикальной цапфой. // С.В. Кононихин Збірник матеріалів II регіональної науково – практичної конференції «Сучасні аспекти механізації енергоємних виробництв». / 25 квітня 2013р., К І І ДонНТУ. Красноармійськ. С. 48- 53.