

3/2015

ISSN 2072-7232

Инженер-нефтяник

№ 3'2015

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Измерение давления
при исследовании
горизонтальных
скважин

Пневмоударное
бурение для проходки
интервалов поглощений

Методика определения
механических свойств
горных пород

Магнитная
характеристика
трубной стали при
изгибе

Эжекционное
оборудование для
очистки скважин

Обоснование
конструкции долот
PDC

Многоярусная
буровая коронка



Интегрированный буровой
сервис

УДК 622.24.051.64

Теоретический метод обоснования конструктивных параметров долот режуще-скалывающего действия

Н.В. Соловьев – доктор. техн. наук, профессор, зав. кафедрой;
 Ю.А. Арсентьев – доцент; Нгуен Тиен Хунг – аспирант; Х.Н. Курбанов – аспирант
 (МГРИ-РГГРУ)

В современных типах бурового породоразрушающего инструмента резцы устанавливаются с различными углами α резания. Наибольшее практическое применение получила схема установки резцов с положительными углами α к плоскости забоя [1]. Подтверждением сказанного являются результаты анализа технико-

технологического обеспечения бурения скважины №406 в горных породах перемежающей твердости и абразивности на территории месторождения Южный Дракон и Дой Мой (РСВ), литолого-стратиграфический разрез, конструкция и профиль ствола которой приведены на рис. 1.

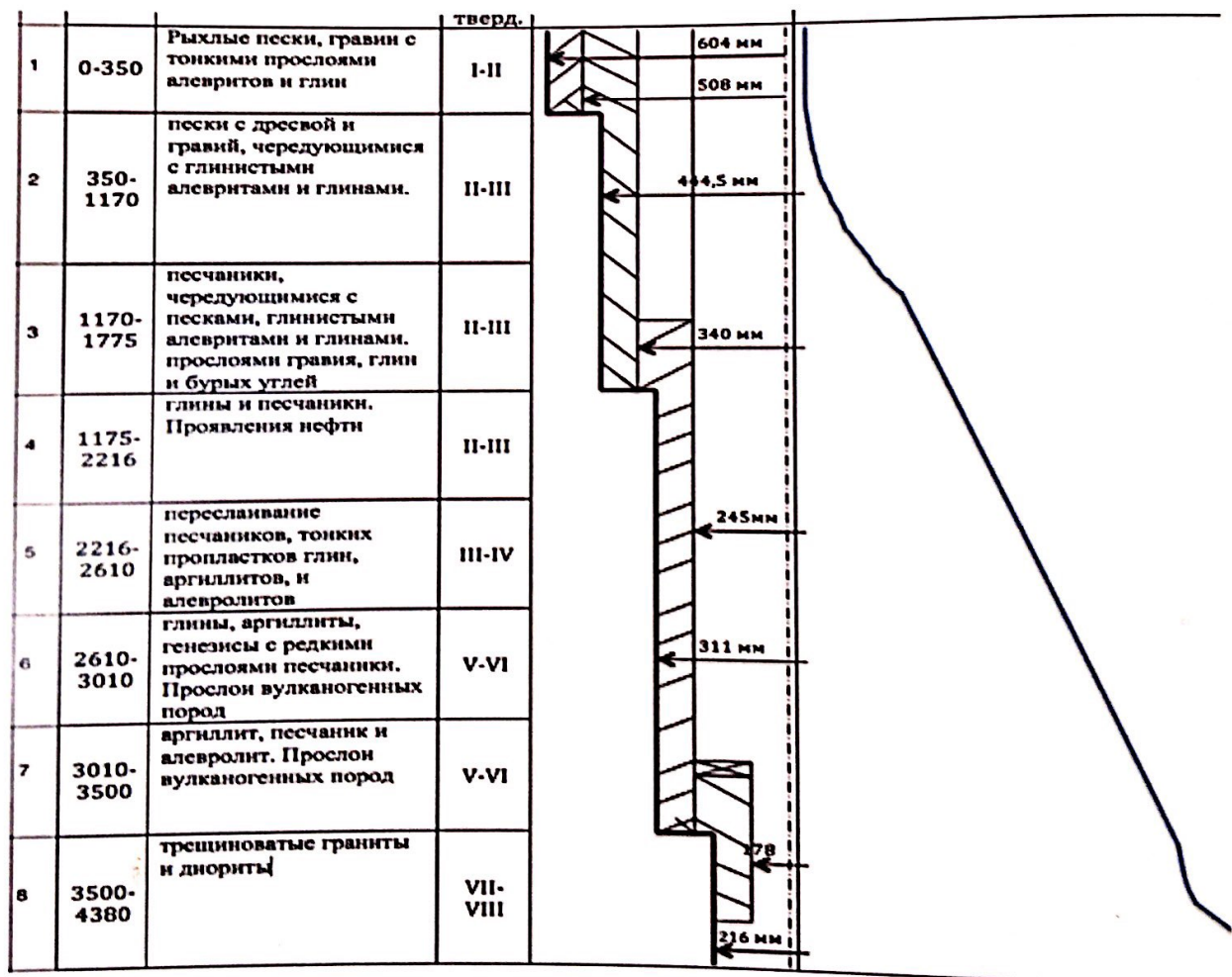


Рис. 1. Литолого-стратиграфический разрез, конструкция и профиль ствола скважины № 406.

Особенность скважины №406 заключается в наличии интервала большой протяженности (2000 м), который приурочен к неоднородным по свойствам и составу горным породам I-VI категории твердости. Поэтому при его прохождении возникало, во-первых, наибольшее число осложнений, связанных с сальникообразованиями, затыжками, кратковременными прихватами, сужениями ствола скважины, прессованием насосов и др. И, во-вторых, отмечалось резкое снижение механической скорости бурения. Показанная на рис. 2 диаграмма о том, что на интервале глубина от 1175 м до 2610 м, соответствующему 4-ой и 5-ой зонам литолого-стратиграфического разреза и сложенного горными породами II-III категории по твердости, бурение скважины осуществлялось с достаточно высокой механической скоростью, достигающей 45÷58 м/час. Однако, при переходе к интервалу глубин от 2610 м до 3500 м, соответствующему 6-ой и 7-ой зонам разреза, наблюдалось резкое снижение механической скорости бурения в среднем до 5÷10 м/час. Такое падение скорости объясняется появлением в указанном интервале глубин вулканогенных пород V-VI категории по твердости, разрушение которых сопровождалось интенсивным износом вооружения долота PDC, оснащенного резацами с положительным углом α резания (рис. 3) и соответствующим уменьшением удельной нагрузки, приходящейся на площадь контакта реза долота с породой.

Таким образом, буровые долота с положительными углами установки резов не могут быть эффективно использованы в породах средней твердости (выше IV категории по твердости). В связи с этим в последние 10-15 лет практикуют схемы установки резов с отрицательными углами резания, которые уже реализуется в ряде конструкций мелко-резовых коронок режущескальвающего действия [4] и в долотах лопастного типа при оснащении их поликристаллическими алмазными резацами и алмазно-твердосплавными пластинами (АТП). При этом ведущие зарубежные и отечественные фирмы устанавливают резы с отрицательными углами в интервале $\alpha = 55\div75^\circ$ [1, 3, 4, 7]. Однако, каких-либо аналитических обоснований этому решению в технической литературе авторы не приводят. Одним из аргументов в пользу выбора такого интервала значений угла можно считать минимум удельной работы, затрачиваемой на разрушение горной породы [2].

Авторами был проведен анализ двух применяемых схем установки резов, прежде всего, с позиции оценки интенсивности их изнашивания. В качестве инструмента этих исследований нами принят достаточно простой и наглядный метод кинестатики, позволяющий оценить главные факторы, определяющие эффективность разрушения горной породы и интенсивность изнашивания резов в процессе бурения.

Первоначально рассмотрена схема установки резов с положительными углами α . Система действующих на резец сил представлена на рис. 4. При этом следует заметить, что авторы намеренно упрощают расчетную схему с тем, чтобы акцентировать внимание на её основных силовых факторах.

Итак, используя известный принцип кинестатики (принцип Даламбера), спроектируем действующие на резец силы на оси O_z и O_x , и получим два уравнения равновесия статики в виде:

$$\sum F_{kz} = -P_z + N_2 + N_1 f_p \sin \alpha - N_1 \cos \alpha = 0; \quad (1)$$

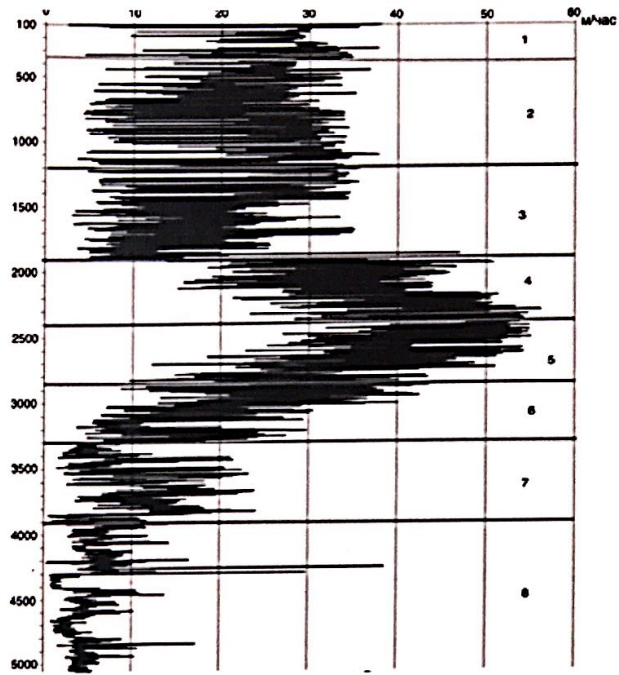


Рис. 2. Изменение механической скорости бурения по длине ствола скважины №406.

$$\sum F_{kx} = -P_o + N_2 f_s + N_1 f_p \cos \alpha + N_1 \sin \alpha = 0, \quad (2)$$

где: P_z – осевая сила на резец;

P_o – окружная сила на резец от передаваемого крутящего момента $M_{кр}$;

F_1 и F_2 – силы трения;

N_1 и N_2 – нормальные реакции;

f_p и f_s – коэффициенты трения породы о фронтальную поверхность реза и в точке контакта реза с забоем;

β – угол заточки реза.

После преобразования уравнений (1) и (2) получим:

$$-P_z + N_2 + N_1 (f_p \sin \alpha - \cos \alpha) = 0; \quad (3)$$

$$-P_o + N_2 f_s + N_1 (f_p \cos \alpha + \sin \alpha) = 0. \quad (4)$$



Рис.3. Долото PDC диаметром 311 мм использованное при бурении скважины №406.

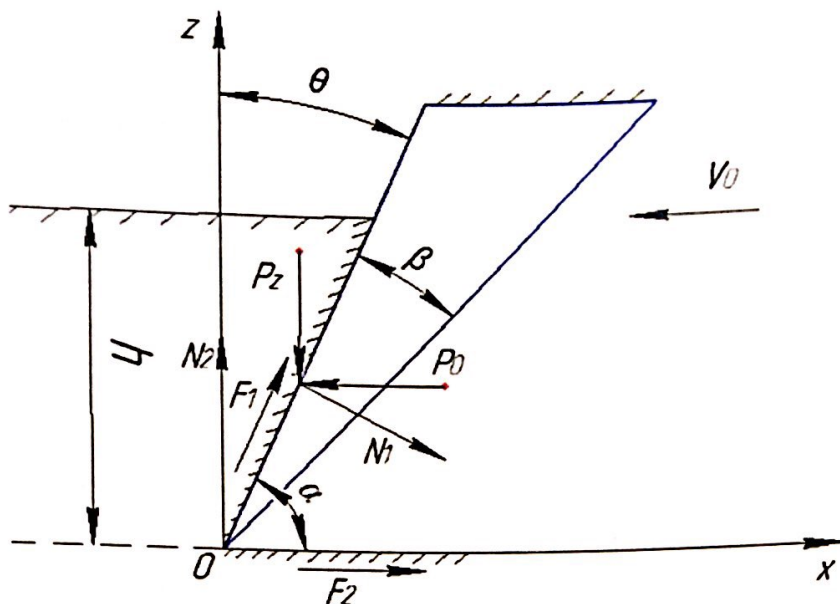


Рис. 4. Схема действующих на резец сил.

Решая уравнение (3) относительно осевой силы P_z , получим:

$$P_z = N_2 + N_1 (f_p \sin \alpha - \cos \alpha). \quad (5)$$

Заметим, что осевая сила P_z , действующая на резец задается технологическим режимом бурения на устье скважины, а на забое ее величина существенно изменяется в зависимости от реакции N_2 забоя и силы взаимодействия фронтальной поверхности резца с породой $N_1 (f_p \sin \alpha - \cos \alpha)$. В свою очередь функция $[A] = (f_p \sin \alpha - \cos \alpha)$ зависит от значения угла α и коэффициента сопротивления f_p .

Из выражения (5) следует, что величина функции $[A]$ будет больше нуля при $\operatorname{tg} \alpha > 1/f_p$; при $\operatorname{tg} \alpha < 1/f_p$ $[A]$ меньше нуля, а при $\operatorname{tg} \alpha = 1/f_p$ данная функция $[A]$ будет равна

нулю. В последнем случае осевая сила P_z , действующая на резец, полностью компенсируется нормальной реакцией N_2 , т.е. P_z полностью расходуется на разрушение забоя. Так для $f_p = 0,2$ и $f_p = 0,3$ значения углов установки резца α будут соответственно равны $\alpha_0 = 78,69^\circ$ и $\alpha_0 = 73,28^\circ$ (см. рис. 5а).

Графики изменения функции $[A]$ от угла α установки резца, и коэффициента сопротивления f_p представлены на рис. 5а.

Анализ графиков (рис. 5а) позволяет установить, что минимальный износ фронтальной поверхности резца будет при $[A] \geq 0$, т.е. при $\alpha \geq \alpha_0 = 73^\circ - 85^\circ$.

При этом положительные значения функции $[A]$ приводят к пропорциональному росту реакции N_2 забоя, силы трения F_2 в точке О и, как следствие, крутящего момента $M_{кр}$ на долоте. В свою очередь повышение силы трения F_2 связано с повышением интенсивности износа торцевой поверхности резца. При этом осевая

сила P_z может быть снижена, при условии установки резца с углом $\alpha < \alpha_0$, т.е. когда функция $[A]$ принимает отрицательные значения, поскольку в этом случае на резец передается дополнительная осевая сила ΔP_z за счет составляющей силы трения F_1 , которая в этом случае изменяет свое направление на противоположное тому, которое показано на рис. 4. Это отрицательно сказывается на состоянии торцевой поверхности резца. Кроме того, следует отметить, что с увеличением значения коэффициента сопротивления f_p величина угла установки резца $\alpha = \alpha_0$ будет уменьшаться.

Кроме того, из выражения (4) следует, что окружная сила P_0 равна:

$$P_0 = N_2 f_p + N_1 (f_p \cos \alpha + \sin \alpha) \quad (6)$$

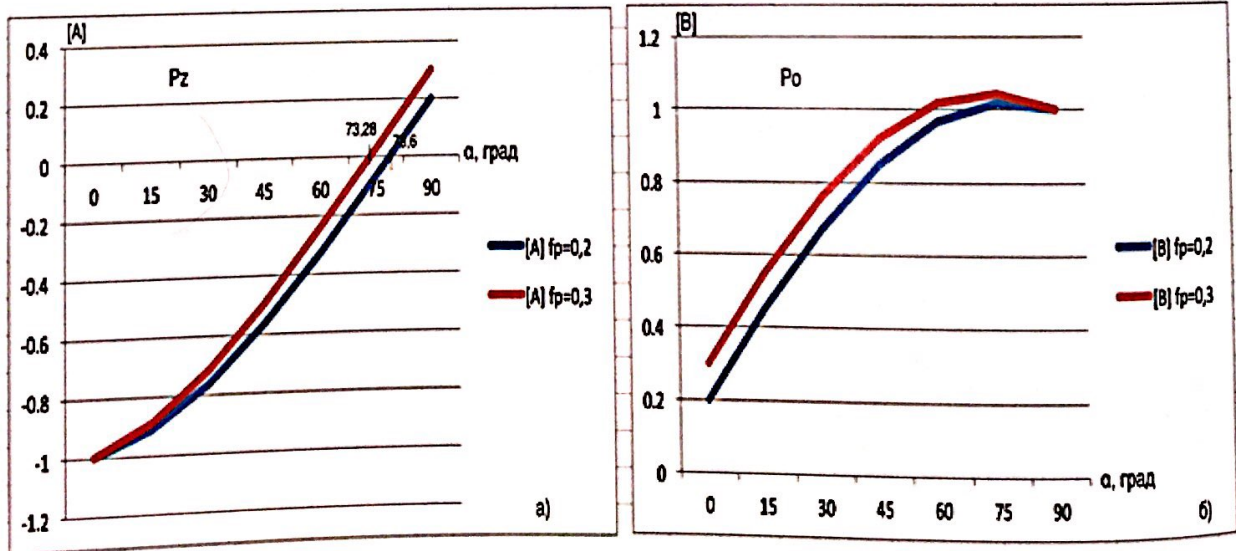


Рис. 5. Графики изменения функций $[A]$ и $[B]$ в зависимости от угла установки резца α .

Обозначим $(f_p \cos \alpha + \sin \alpha) = [B]$. Очевидно, чем меньше $[B]$, тем меньше окружная сила P_0 и крутящий момент $M_{кр}$ на долоте. Поэтому функция $[B]$ должна стремиться к минимуму.

Исследуем функцию $[B]$ на экстремум:

$$[B]' = (-f_p \sin \alpha + \cos \alpha) = 0,$$

откуда $\operatorname{tg} \alpha = 1/f_p$, тогда $\alpha = \alpha_0 = \arctg 1/f_p$.

Причем $[B]'' = (-f_p \cos \alpha - \sin \alpha) < 0$, следовательно при $\alpha = \alpha_0$ функция $[B]$ имеет максимум. Так для $f_p = 0,2$ и $f_p = 0,3$, как известно, угол α_0 составит соответственно $\alpha_0 = 78,69^\circ$ и $\alpha_0 = 73,28^\circ$. Результаты расчетов функции $[B]$ в зависимости от значений угла $\alpha = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ и 90° показаны в виде графиков на рис. 5б. Из графиков следует, что уменьшая угол α установки реза, работающего в режиме раздавливания (смятия) породы имеет место также значительное увеличение реакции N_1 и соответственно силы трения F_1 , что в свою очередь приводит к росту крутящего момента $M_{кр}$ на долоте.

В практике бурения этот метод известен, как винтобурение, когда острый резец при $\alpha < \alpha_0$ с винтовой поверхностью ввинчивается в породу без приложения дополнительных осевых сил. Однако этот метод реализуется в ограниченных масштабах только в мягких, пластичных породах при малых глубинах (30÷50 м).

Складывая уравнения (3) и (4) и вводя обозначения, получим уравнение в виде:

$$P_z + P_0 = N_2 (f_s + 1) + N_1 [(f_p + 1) \sin \alpha - (1 - f_p) \cos \alpha],$$

$$P_z + P_0 = N_2 (f_s + 1) + N_1 [C], \quad (7)$$

$$P_z + P_0 = N_2 (f_s + 1) + [\sigma_p] S(h) [C],$$

где: $[C]$ - комплексный коэффициент сопротивления породы разрушению и её трению о фронтальную поверхность реза;

$(f_s + 1)$ - комплексный коэффициент сопротивления реза трению о забой скважины;

$S(h)$ - площадь контакта реза с породой;

h - глубина внедрения реза;

$[\sigma_p]$ - временное сопротивление породы разрушению, причем значение $[\sigma_p]$ зависит от того, в каком режиме осуществляется разрушение породы - смятием, скалыванием и др.

Поскольку слагаемые $N_2 (f_s + 1)$ и $N_1 [C]$ определяют параметры режимов бурения и характеризуют собой сопротивление горной породы разрушению и трению, поэтому они должны быть сведены к минимуму.

Предположим, что функцию силы трения $F_1 = N_1 f_p$ выполняет величина $[C]$, которую можно исследовать на предмет влияния угла α на силу трения F_1 , действие которой непосредственно связано с износом фронтальной поверхности реза.

Для этого исследуем функцию $[C]$ на экстремум, приравняв первую производную данной функции по углу α нулю:

$$\frac{d}{d\alpha} [C] = (f_p + 1) \cos \alpha + (1 - f_p) \sin \alpha = 0$$

Откуда следует, что функция $[C]$ экстремума не имеет. Для построения графика изменения функции $[C]$ от угла α , присвоим α характерные значения, например, $\alpha = 0^\circ$ и $\alpha = 90^\circ$. Тогда при $\alpha = 0^\circ$, $[C] = (f_p - 1)$, т.е. $[C] < 0$; при $\alpha = 90^\circ$, $[C] = (f_p + 1)$, т.е. $[C] > 0$. Следовательно, существует некоторое значение угла $\alpha = \alpha_0$, при котором функция $[C]$ равна нулю.

Приравняв функцию $[C]$ нулю, найдем угол α установки реза, при котором параметры режимов бурения P_z и P_0 расходятся только на преодоление силы сопротивления со стороны забоя скважины.

$$[C] = (f_p + 1) \sin \alpha - (1 - f_p) \cos \alpha = 0, \text{ откуда}$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{1 - f_p}{1 + f_p}, \text{ тогда}$$

$$\alpha = \alpha_0 = \arctg \frac{1 - f_p}{1 + f_p} \quad (8)$$

В качестве примера рассмотрим значения функции $[C]$ при углах $\alpha = 0^\circ; 30^\circ; 45^\circ; 60^\circ$ и 90° , коэффициент сопротивления $f_p = 0,2$ и $f_p = 0,3$. Результаты расчетов приведены в табл. 1 и на рис. 6. Для принятых исходных данных углы установки будут равны соответственно $\alpha_0 = 31^\circ$ и $\alpha_0 = 28^\circ 20'$.

Для анализа влияния коэффициента трения горной породы о фронтальную поверхность реза на функцию $[C]$ рассмотрим её при изменении коэффициента трения f_p и фиксированном угле $\alpha = 60^\circ$ установки реза. Результаты расчетов приведены в табл. 2 и на рис. 7.

Расчетные данные указывают на то, что комплексный коэффициент $[C]$ сопротивления породы разрушению увеличивается пропорционально росту значения коэффициента f_p трения горной породы о фронтальную поверхность реза. Поэтому в процессе бурения смазывающая способность промывочной жидкости играет очень важную роль, которая состоит в уменьшении коэффициента f_p трения породы о фронтальную поверхность реза, и снижении температуры нагрева, что способствует увеличению механической скорости и уменьшению износа долота.

Однако, износ реза в окрестностях точки О (рис. 4) имеет существенно большие негативные последствия, т.к. это вершина рассматриваемого реза, имеющая заданный

Таблица 1. Значения функции $[C]$.

α , град.	$\sin \alpha (1 + f_p)$		$-\cos \alpha (1 - f_p)$		$[C]$	
	$f_p = 0,2$	$f_p = 0,3$	$f_p = 0,2$	$f_p = 0,3$	$f_p = 0,2$	$f_p = 0,3$
0	0	0	-0,8	-0,7	-0,8	-0,7
30	0,6	0,65	-0,68	-0,6	-0,08	0,05
45	0,84	0,92	-0,56	-0,49	+0,28	0,43
60	1,03	1,12	-0,4	-0,35	0,63	0,77
90	1,2	1,3	0	0	+1,2	1,3

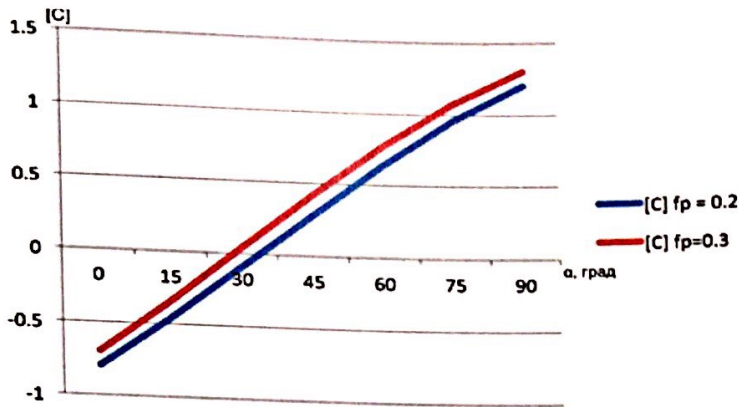


Рис. 6. Зависимость значения функции [C] от угла установки реза.

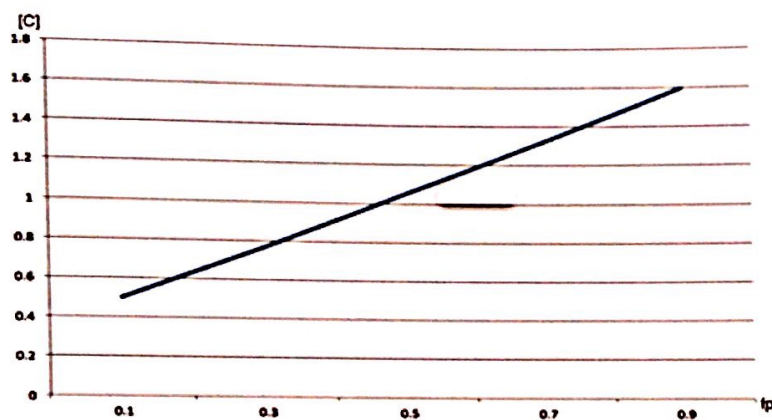


Рис. 7. График изменения функции [C] от коэффициента f_p трения горной породы о фронтальную поверхность реза.

угол заточки. Определим силу трения F_2 в точке O. Для этой цели сложим два уравнения (3) и (4), а силу трения $F_2 = N_2 (f_3 + 1)$ представим в виде выражения:

$$N_2 (f_3 + 1) = P_z + P_o - N_1 [C]. \quad (9)$$

Чтобы уменьшить силу трения F_2 , необходимо, чтобы функция [C] стремилась к максимуму, а это возможно, когда угол установки реза стремится к 90° (рис. 6).

Известно, что окружная сила P_o определяется выражением (6).

$$P_o = N_2 f_3 + N_1 (f_p \cos \alpha + \sin \alpha).$$

Величина P_o будет минимальной, если слагаемые $N_2 f_3$ и $N_1 (f_p \cos \alpha + \sin \alpha)$ стремятся к минимуму. Поскольку при $\alpha = \alpha_o$ функция $[A] = (f_p \sin \alpha_o - \cos \alpha_o) = 0$, то из выражения (5) следует, что реакция N_2 забоя скважины равна: $N_2 = P_z - N_1 (f_p \sin \alpha_o - \cos \alpha_o) = P_z$, а $N_1 (f_p \cos \alpha_o + \sin \alpha_o)$ стремится к минимуму, поэтому окружная сила P_o при заданной осевой силе P_z будет равна:

$$P_o = P_z f_3 + [\sigma_p] S(h) (f_p \cos \alpha_o + \sin \alpha_o), \quad (10)$$

Таблица 2. Значения функции [C] при изменении коэффициента трения горной породы о фронтальную поверхность реза f_p .

f_p	$\sin \alpha (1 + f_p)$	$-\cos \alpha (1 - f_p)$	[C]
0,1	0,95	-0,45	0,5
0,3	1,12	-0,35	0,77
0,5	1,30	-0,25	1,05
0,7	1,47	-0,15	1,32
0,9	1,64	-0,05	1,59

где: $\alpha_o = \arctg \frac{1}{f_p} \alpha_o = 78,69^\circ$ для $f_p = 0,2$;

$\alpha_o = 73,28^\circ$ для $f_p = 0,3$;
 $\alpha_o = 63,43^\circ$ для $f_p = 0,5$.

Решая уравнение (10), при заданной окружной силе P_o , являющейся результатом приложения крутящего момента $M_{кр}$, получим уравнение для определения осевой силы:

$$P_z = \frac{P_o - [\sigma_p] S(h) (f_p \cos \alpha_o + \sin \alpha_o)}{f_3}. \quad (11)$$

Что касается углов β заточки реза, то существующие в справочной литературе [1, 4, 5, 6] рекомендации основаны на большом экспериментальном материале и не подлежат серьезной корректировке.

Таким образом, из выше изложенного следует, что схема установки резов с положительными углами в пределах $\alpha = 75^\circ \div 85^\circ$ обеспечивает минимальный износ реза в окрестностях точки O и, вероятно, этим объясняется широкое применение данной схемы в практике. Полученные выводы подтверждаются результатами бурения скважины №406 в горных породах I-IV категории по твердости. При этом механическая скорость может достигать большого значения (см. интервал бурения №4 и 5 на рис. 2).

Далее рассмотрим действующие силы на резец установленный с отрицательным углом α резания (рис. 8). Аналогично составим два уравнения равновесия реза в виде:

$$\sum F_{kz} = -P_z + N_2 + N_1 \cos \alpha + N_1 f_p \sin \alpha = 0 \quad (12)$$

$$\sum F_{kx} = -P_o + N_2 f_3 + N_1 \sin \alpha - N_1 f_p \cos \alpha = 0 \quad (13)$$

Решая уравнения (12) и (13) относительно режимных параметров P_z и P_o , получим соответственно:

$$P_z = N_2 + N_1 (\cos \alpha + f_p \sin \alpha) \quad (14)$$

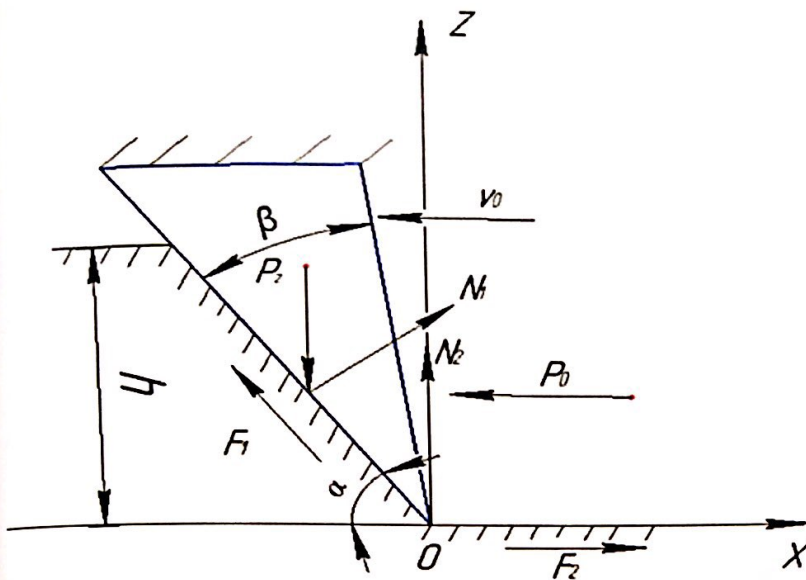


Рис. 8. Схема действующих сил на резец.

$$P_o = N_2 f_3 + N_1 (\sin \alpha - f_p \cos \alpha) \quad (15)$$

Величина осевой силы P_z на долото задана технологическим режимом бурения, поэтому $P_z = \text{const}$. Кроме того, в отличие от резцов с положительными углами не возникают ситуации, связанные с дополнительной осевой силой ΔP_z резца, т.е. $(\cos \alpha + f_p \sin \alpha) > 0$. А вот окружная сила P_o , действующая на резец, зависит от реакции N_1 , коэффициентов трения f_p, f_3 и от значений принятого углов α . Так для характерных значений углов α : 0° и 90° , значения функции $(\sin \alpha - f_p \cos \alpha) = [G]$ будут соответственно равны: $-f_p$ и 1. График изменения этой функции будет иметь вид, показанный на рис. 9.

Складывая уравнения (12) и (13), имеем:

$$P_z + P_o = N_2 (f_3 + 1) + N_1 [\sin \alpha (1 + f_p) + \cos \alpha (1 - f_p)]$$

$$P_z + P_o = N_2 (f_3 + 1) + N_1 [D] \quad (16)$$

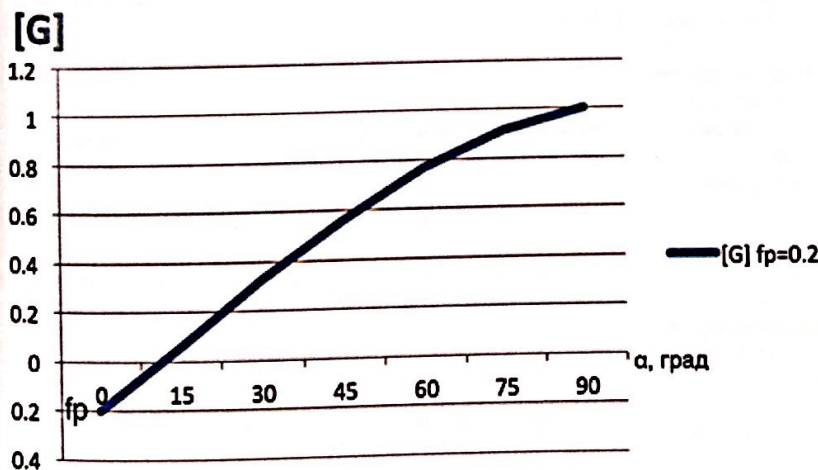


Рис. 9. График зависимости функции $[G]$ от угла установки резца α .

Наибольший практический интерес представляет вопрос о влиянии угла α и коэффициентов трения f_p, f_3 на износ резца в окрестностях точки O . Интенсивность такого износа определяется силой трения $F_2 = N_2(f_3)$. Из выражения (16) следует, что

$$N_2 (f_3 + 1) = P_z + P_o - N_1 [D],$$

$[D] = [\sin \alpha (1 + f_p) + \cos \alpha (1 - f_p)]$ – комплексный коэффициент сопротивления горной породы разрушению и трению.

Величина функции $[D]$ непосредственно влияет на силу трения F_1 , поэтому целесообразно, чтобы функция $[D]$ стремилась к минимуму. Для этого исследуем функцию $[D]$ на экстремум.

$$[\sin \alpha (1 + f_p) + \cos \alpha (1 - f_p)] = 0,$$

$$\frac{d}{d\alpha} \cos \alpha (1 + f_p) - \sin \alpha (1 - f_p) = 0,$$

откуда $\text{tg} \alpha = \frac{(1 + f_p)}{(1 - f_p)}$, тогда

$$\alpha = \alpha_0 = \text{arctg} \frac{1 + f_p}{1 - f_p}. \quad (17)$$

Функция $[D]$ при $\alpha = \alpha_0$ имеет максимум, поскольку вторая производная функции $[D]$ по углу α меньше нуля, т.е.

$$\frac{d^2}{d\alpha^2} [(1 + f_p) \sin \alpha + (1 - f_p) \cos \alpha] < 0$$

В качестве примера рассмотрим значения функции $[D]$ при углах $\alpha = 0^\circ; 30^\circ; 45^\circ; 60^\circ$ и 90° , для $f_p = 0,2$ и $f_p = 0,3$. Результаты расчетов приведены в табл. 3 и на рис. 10.

Таким образом, минимальный износ резца по фронтальной поверхности происходит при

$$\alpha = \alpha_0 = \text{arctg} \frac{1 + f_p}{1 - f_p}.$$

При $f_p = 0,2$ получаем $\alpha = 56^\circ 20'$; а при $f_p = 0,3$ $\alpha = 61^\circ 40'$.

Кроме того, полученное теоретическое решение (17) хорошо согласуется с широким промышленным использованием резцов режущескальвующего типа [7] и лопастных долот РДС, оснащенных резцами АТП ведущими зарубежными фирмами в рыхлых и мягких породах (I-IV категории по твердости).

Численное значение N_1 определяет эффективность разрушения породы: $N_1 > S(h)[\sigma_p]$. Уравнение (16) представим в виде

$$N_1 = \frac{P_z + P_o - N_2 (f_3 + 1)}{[D]} \geq \quad (18)$$

$$\geq S(h)[\sigma_p] < S(h)[\sigma_p'],$$

Таблица 3. Результаты расчетов значения функции [D].

α, град.	sin α (1 + f _p)		cos α (1 - f _p)		[D]	
	f _p = 0,2	f _p = 0,3	f _p = 0,2	f _p = 0,3	f _p = 0,2	f _p = 0,3
0	0	0	0,8	0,7	0,8	0,7
30	0,6	0,65	0,68	0,6	1,29	1,25
45	0,84	0,92	0,56	0,49	1,40	1,41
60	1,03	1,12	0,40	0,35	1,43	1,47
90	1,2	1,3	0	0	1,2	1,3

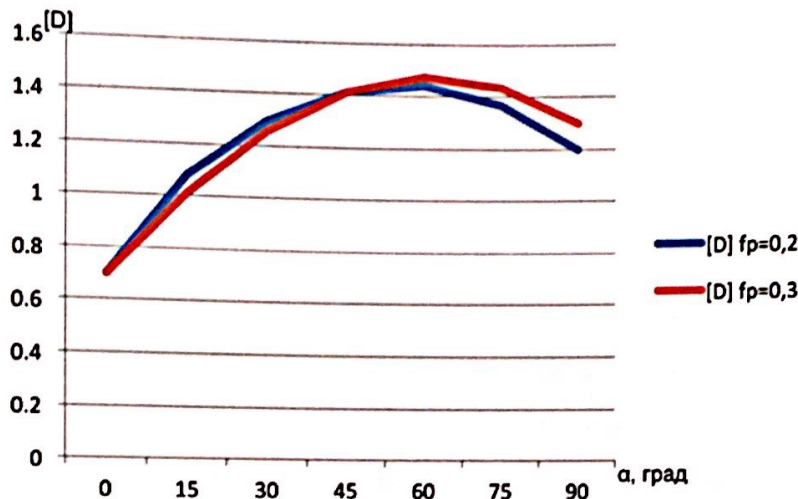


Рис. 10. Зависимость значения функции [D] от угла α.

где: $[\sigma'_p]$ – временное сопротивление резца разрушению. Из приведенного выражения (18) следует, что разрушающее усилие на горную породу для резцов, устанавливаемых с отрицательным углом, создается не только окружной силой P_0 , но и осевой силой P_z . Это обстоятельство необходимо учитывать при проектировании режима бурения, чтобы обеспечить оптимальные условия разрушения породы и не вызвать поломок самого резца. Отметим, что решающую роль при этом играют значения угла α и коэффициентов трения f_p и f_s . Если, например, определено оптимальное усилие на породу N_1 , то значения P_0 и P_z можно снизить, если [D] стремится к максимуму, который, как мы выяснили, достигается при

$$tg\alpha = \frac{1 + f_p}{1 - f_p}$$

Определим осевую силу P_z . Для этого выразим окружную силу P_0 через N_1 , как $P_0 = N_1 \sin \alpha$, тогда после подстановки в уравнении (16), имеем

$$P_z = N_2 (f_s + 1) + N_1 [f_p \sin \alpha - f_p \cos \alpha + \cos \alpha], \quad (19)$$

или

$$P_z = N_2 (f_s + 1) + N_1 [J]. \quad (20)$$

По условию задачи функция [J] должна стремиться к минимуму. При $\alpha = 0^\circ$, $[J] = (1 - f_p)$; при $\alpha = 90^\circ$, $[J] = f_p$. Исследуем функцию [J] на экстремум

$$\frac{d}{d\alpha} [f_p \sin \alpha - f_p \cos \alpha + \cos \alpha] =$$

$$f_p \cos \alpha + f_p \sin \alpha - \sin \alpha = 0, \text{ откуда}$$

$$tg\alpha = \frac{f_p}{1 - f_p}, \text{ тогда}$$

$$\alpha = \alpha_0 = \arctg \frac{f_p}{1 - f_p}. \quad (21)$$

Функция [J] имеет максимум, так как ее вторая производная меньше нуля, т.е.

$$\frac{d^2}{d\alpha^2} [f_p \sin \alpha - f_p \cos \alpha + \cos \alpha] =$$

$$= -f_p \sin \alpha + f_p \cos \alpha - \cos \alpha < 0.$$

Следовательно, функция [J] имеет максимум для $f_p = 0,3$ при

$$tg\alpha = \frac{f_p}{1 - f_p} = \frac{0,3}{1 - 0,3} = 0,42;$$

что соответствует углу $\alpha = \alpha_0 = 22^\circ 50'$. Для $f_p = 0,4$ $\alpha = \alpha_0 = 33,66^\circ$, для $f_p = 0,5$ $\alpha = \alpha_0 = 45^\circ$, для $f_p = 0,6$ $\alpha = \alpha_0 = 56,3^\circ$. График функции [J] для $f_p = 0,3$ в зависимости от угла α представлена на рис. 11.

Таким образом, сила трения F_2 может быть уменьшена, если использовать установку резца при малом значении угла α .

Исследуем величину осевой силы P_z , передаваемой на резец. Установка резца под отрицательным углом α позволяет сообщить рабочей поверхности резца дополнительную осевую силу за счет окружной силы P_0 .

Кроме того, обращает внимание, что по мере роста значений f_p угол α_0 возрастает (рис. 12).

Из выражения (12) следует, что осевая сила P_z будет равна

$$P_z = N_2 + N_1 [A]. \quad (22)$$

Для определения реакции забоя N_2 воспользуемся выражением (16), откуда следует

$$N_2 (f_s + 1) = P_z + P_0 - N_1 [D]. \quad (23)$$

После подстановки (23) в (22) и простейших преобразований имеем.

$$P_z f_s = P_0 - N_1 [D] + N_1 [A] (f_s + 1),$$

но т.к. окружную силу P_0 можно выразить как $P_0 = N_1 \sin \alpha$, то с учетом данного результата имеем

$$P_z f_s = N_1 \sin \alpha - N_1 [D] + N_1 [A] (f_s + 1),$$

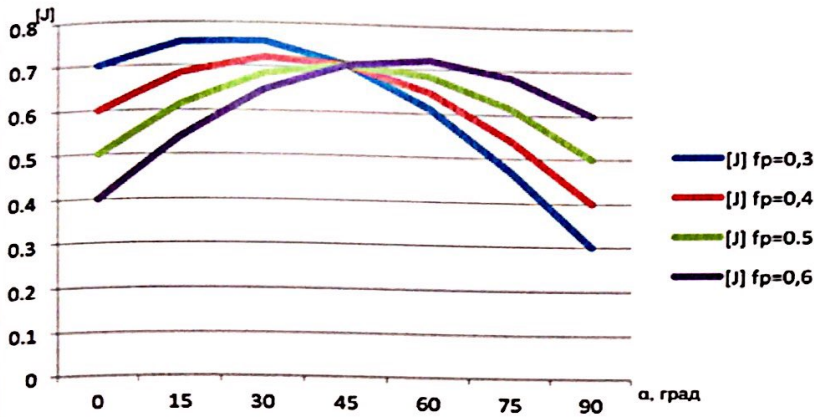


Рис. 11. Зависимость значения функции [J] от угла α установки.

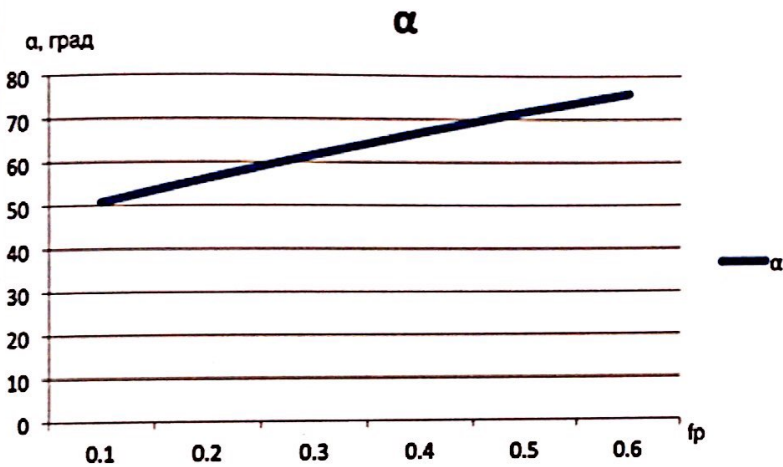


Рис. 12. График зависимости угла установки α₀ резца от значений коэффициента f_p трения.

$$P_z = \frac{N_1 \{ (f_p \cos \alpha - f_p \sin \alpha - \cos \alpha) + [A](f_s + 1) \}}{f_s}$$

Обозначим $(f_p \cos \alpha - f_p \sin \alpha - \cos \alpha) = [H]$

$$P_z = \frac{N_1 \{ [H] + [A](f_s + 1) \}}{f_s}$$

С учетом формулы (18) осевую силу P_z определяем выражением вида

$$P_z = \frac{(S(h)[\sigma_p] \{ [H] + [A](f_s + 1) \})}{f_s} \quad (24)$$

Правая часть выражения (24) зависит от заданных условий (S(h); [σ_p]; f_p; f_s; α). Например, для S(h) = 0,5 см²; [σ_p] = 50 дан; f_p = f_s = 0,3 и α = 22°50' значение необходимой осевой силы P_z на резец составляет 37,5 дан, что в 1,5 раз выше, чем это следует при положительном угле резания - 25 дан.

Таким образом, установка резцов из сплава типа ВК в долотах лопастного типа под отрицательным углом резания не имеет в породах средней твердости и твердых

каких-либо заметных преимуществ перед традиционными схемами. Это касается, как интенсивности износа резца, так и использования осевых сил, действующих на породоразрушающий инструмент, поскольку для разрушения породы в режиме смятия (раздавливания) необходимо с учетом увеличения площади контакта резца с породой увеличивать осевую силу P_z в

$$\frac{2}{\cos \alpha} \text{ раза.}$$

Поэтому в таких горных породах успешно используются резцы из алмазо-твердосплавных пластин и др. Износ такого резца в течение рейса характеризуется преимущественным износом относительно «мягкой» подложки толщиной до 5÷6 мм, в то время как тонкий слой (до 1 мм) из спеков мелких алмазов и твердого сплава разрушает породу, подобно самозатачивающимся резцам, в режиме микрорезания (внутреннего трения), а не в режиме раздавливания (смятия) породы, как это имеет место у твердосплавных резцов.

Ранее авторами было установлено, что при углах α = 53°÷58° имеет место минимальный износ твердосплавного (ВК) резца в окрестностях точки О. Естественно предположить, что при углах [90 - (53°÷58°)] имеет место интенсивный износ резца АТП преимущественно относительно его «мягкой» подложки. Поэтому установка типа АТП в породах выше средней твердости и твердых с отрицательным углом соответственно 26°÷34° обеспечивает эффективное разрушение этих пород за счет постоянного их самозатачивания в течение всего рейса с образованием шлама более крупных фракций [7]. Следует отметить, что такого рода породоразрушающие инструменты требуют более интенсивной промывки ствола для удаления шлама и охлаждения алмазосодержащего слоя.

Резцы типа АТП, устанавливаемые с отрицательными углами в породах выше средней твердости обеспечивают в несколько раз большую глубину «резания», чем единичные алмазы в традиционных породоразрушающих инструментах. Так, например, если использовать общепринятую однослойную установку алмазов, то в трехлопастном долоте углубка за оборот составит не более 0,003÷0,006 мм, в то время как резец АТП позволяет повысить эту величину до 0,15÷0,3 мм. Именно это обстоятельство предопределяет высокие механические скорости бурения скважин.

Однако следует заметить, что недостатком рассматриваемого метода решения задачи по определению параметров взаимодействия резцов PDC с горной породой на забое в процессе её разрушения является то, что принимается начальное условие этого взаимодействия когда резец еще не имеет притупления. Притупление резца PDC в процессе бурения увеличивается, возрастает площадь его

контакта с горной породой, что приводит к снижению удельной контактной нагрузки на забой и закономерному падению механической скорости бурения. В отличие от этого метода решения ранее предложенный механизм разрушения горной породы, позволяющий определить составляющие силы ее резания резами PDC, учитывает наличие площадки притупления этих резцов по мере ее увеличения [5, 6]. Это приводит к возрастанию подъемной силы, способствующей увеличению нормальных напряжений на границе контакта площадки притупления или изнашиваемой плоской площадки резца и горной породой на забое. Исходя из этого, определение силовых характеристик взаимодействия резцов PDC с горной породой при её разрушении и увеличении площади контакта (притупления) по мере их изнашивания, должно явиться предметом наших дальнейших исследований.

Выводы и рекомендации

1. Схема установки резцов с отрицательными углами резания не имеет существенных преимуществ по отношению к традиционным схемам (под прямым или положительными углами) для резцов из твердых сплавов при бурении скважин в рыхлых и мягких породах.

2. Схема установки твердосплавных резцов с отрицательными углами резания проигрывает традиционным схемам установки по силовым и энергетическим параметрам.

3. При бурении скважин в мягких и рыхлых породах (до IV категории по твердости) резцы могут быть установлены как с положительными углами в диапазоне не $73^\circ-85^\circ$, так и с отрицательными углами резания в диапазоне $53^\circ-58^\circ$, поскольку в указанных диапазонах этих углов установки гарантируется минимальный их износ.

4. При бурении скважин в породах средней и выше средней твердости (V-VII) резцы должны быть установлены с отрицательными углами в диапазоне $26^\circ-34^\circ$, при этом они должны быть изготовлены из алмазосодержащих композиционных материалов.

5. Предметом дальнейших исследований должно явиться совершенствование методики расчета силовых параметров взаимодействия породоразрушающих резцов с горной породой на забое с рассмотрением в динамике изменения площадки их притупления по мере изнашивания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арефьева В.В., Кочуков В.В. Повышение эффективности бурения за счет применения долот режущего типа // Инженер-нефтяник. 2007. №2, с. 25-28.
2. Башкатов Д.Н. Оптимизация процесса бурения. Н. Новгород, 2007.
3. Будюков Ю.Е., Власюк В.И., Спирин В.И. Алмазный породоразрушающий инструмент НПП. Тула: «Гриф и к», 2005.
4. Соловьев Н.В., Башкатов Д.Н. и др. Бурение разведочных скважин. М.: Высшая школа, 2007. 904 с.
5. Соловьев Н.В., Башкатов Д.Н., Горшков Л.К. и др. Геологоразведочный породоразрушающий инструмент на основе алмазов и сверхтвердых материалов. Изд. Южно-Российского государственного технического университета (НПИ), Новочеркасск: 2009.
6. Соловьев Н.В., Исонкин А.М., Богданов Р.К., Шестаков С.И. Механизм разрушения горной породы и определение составляющих сил ее резания буровым инструментом, оснащенным алмазно-твердосплавными пластинами // Инженер-нефтяник. 2010. №1. с. 33-36.
7. Чихоткин В.В. Исследование техники и технологии бурения геолого-разведочных скважин и разработка нового поколения алмазного породоразрушающего инструмента. М.: 1997.
8. Шамансуров И.И., Зиявиддинов С.Ш. Основы конструирования породоразрушающего инструмента для бурения шпуров и скважин. М.: Недра, 1986.

REFERENCES

1. Arefeva V.V., Kochukov V.V. (2007). Cutting bits: improvement of drilling effectiveness. // Inzhenerneftjanik. 2007. #2, p. 25-28.
2. Bashkatov D.N. (2007). Drilling process optimization N. Novgorod/
3. Budjukov Ju.E., Vlasjuk V.I., Spirin V.I. (2005). Diamond drilling tools. NPP. Tula.
4. Solov'ev N.V., Bashkatov D.N. et al. (2007). Exploratory drilling. M.: Vysshaja shkola. 904 p.p.
5. Solov'ev N.V., Bashkatov D.N., Gorshkov L.K. (2009). Geological prospecting tools on the basis of diamond and superhard material. South Russian State Technical University publisher. Novocherkassk.
6. Solov'ev N.V., Isonkin A.M., Bogdanov R.K., Shestakov S.I. (2010). Rock disintegration mechanism and cutting force resolutions determination for bit with diamond and hard-alloy elements. Inzhenerneftjanik. #1. p. 33-36.
7. Chihotkin V.V. (1997). Exploratory drilling: study of processes and technology. Design of new generation of diamond drilling tool.
8. Shamansurov I.I., Ziyaviddinov S.Sh. (1986). Rock disintegration tool for shot hole and well drilling: principles of design. M.: Nedra.