



УДК 622.24.05

## АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД РЕЗЦАМИ PDC С УЧЕТОМ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ РЕЗАНИЯ-СКАЛЫВАНИЯ ГОРНОЙ ПОРОДЫ И СОПРОТИВЛЕНИЯ СРЕДЫ



### ANALYTICAL STUDY OF THE MECHANICS OF DESTRUCTION OF ROCKS BY PDC CUTTERS TAKING INTO ACCOUNT DYNAMIC PROCESSES OF CUTTING-CHIPING OF ROCK AND MEDIUM RESISTANCE

**Нескоромных Вячеслав Васильевич**

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Технология  
и техника разведки месторождений полезных ископаемых»,  
Институт горного дела, геологии и геотехнологий,  
Сибирский Федеральный Университет  
sovair@bk.ru

**Чихоткин Алексей Викторович**

аспирант,  
Китайский геологический университет,  
г. Ухань, Китай  
vch56@mail.ru

**Аннотация.** В статье рассматривается механика разрушения горных пород резцами PDC с учетом динамических процессов резания-скалывания горной породы и сопротивления среды. В данном случае под средой понимается влияние бурового раствора, насыщенного шламом, а также слой уже разрушенной, но еще не удаленной из зоны разрушения породы. В этом случае плотность среды может достигать высокого значения, и с учетом линейной скорости перемещения резцов по забою, а также того, что размеры резцов могут быть достаточно велики (10–25 мм), влияние среды, а также слоя разрушенной, но еще не удаленной из зоны разрушения горной породы может быть существенно. В этом случае возникает необходимость учитывать влияние, как динамических процессов резания-скалывания, так и влияние среды при выполнении расчетов, в том числе при компьютерном моделировании при проектировании параметров буровых инструментов с целью создания долот и буровых головок высоких эксплуатационных качеств.

**Ключевые слова:** бурение, PDC, буровое долото, разрушение горных пород.

**Neskoromnykh Viacheslav Vasilievich**

Doctor of Engineering Science,  
Professor, Head of department,  
Siberian Federal University  
sovair@bk.ru

**Chikhotkin Alexey Victorovich**

Postgraduate Student,  
China University of Geoscience,  
Wuhan, China  
vch56@mail.ru

**Annotation.** The article discusses the mechanics of rock destruction by PDC cutters taking into account the dynamic processes of cutting-cleaving rocks and environmental resistance. In this case, the medium is understood as the influence of the drilling fluid saturated with sludge, as well as the layer already destroyed, but not yet removed from the rock destruction zone. In this case, the density of the medium can reach a high value, and taking into account the linear speed of movement of the incisors along the face, as well as the fact that the size of the incisors can be quite large (10–25 mm), the influence of the medium, as well as the layer destroyed, but not yet removed from the rock destruction zone can be significant. In this case, it becomes necessary to take into account the influence of both dynamic cutting-chipping processes and the influence of the environment when performing calculations, including computer modeling when designing the parameters of drilling tools in order to create bits and drill heads of high performance.

**Keywords:** drilling, PDC, boring chisel, destruction of rocks.

Современное развитие добывающих отраслей промышленности требует усовершенствования технологии бурения скважин, увеличении механической скорости проходки, проходки на долото, снижение вибрационного режима в процессе бурения в условиях высокой изменчивости физико-механических свойств горных пород [2, 7]. Особенно высоки требования к эксплуатационным параметрам долот при проходке глубоких и протяженных стволов скважин сложного профиля, предназначенных для добычи углеводородного сырья. В таких условиях выбор конструкции долота, схемы резцов и параметры режима бурения имеют большое значение для технико-экономических показателей процесса бурения горных пород.

Резцы PDC (*polycrystalline diamond cutters*) широко используются при бурении горных пород в широком диапазоне разброса параметров горных пород и обладают высокой износостойкостью и работоспособностью [2, 3, 7–13].



Важнейшим параметром работы долота режуще-скалывающего действия является линейная скорость перемещения реза по забою. Ранее рядом авторов рассмотрено влияние на процесс резания-скалывания горной породы линейной скорости реза и других параметров [1–6].

Наиболее известны из работ исследования К.И. Борисова, который провел цикл экспериментальных работ и показал связь сопротивления резанию-скалыванию и глубины образуемой борозды разрушения от линейной скорости перемещения реза по забою [4, 5]. Учитывая, что линейные скорости перемещения резцов размещенных на периферии торца по забою при использовании долот большого диаметра могут достигать высоких значений (до 4–6 м/с), а также то, что такие скорости существенно влияют на сопротивление горной породы разрушению, исследования динамических составляющих механики разрушения горных пород представляется важными [6,7].

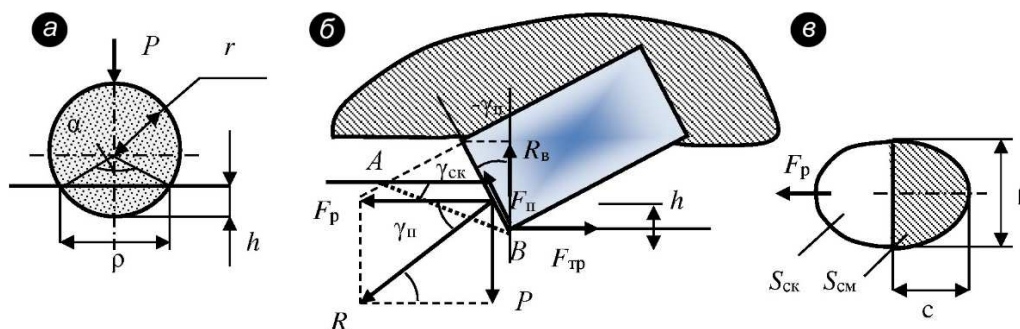
Актуальность представленного исследования определяется также тем, что ранее достаточно ограниченно рассматривалось влияние геометрии вооружения бурового инструмента долот с резцами типа PDC с учётом влияния среды, тем более с учётом того, что буровой раствор в призабойной зоне всегда перенасыщен шламом, а значит, его плотность может быть существенно более высокой.

Целью исследования является повышение стойкости долот с резцами PDC, определяющей их ресурс и производительность за счет применения усовершенствованной теории при проектировании долот с учетом динамических особенностей механизма разрушения горных пород и сопротивления среды.

Развитие долотного производства ставит перед исследователями ряд задач, решение которых приводит к более эффективной и экономичной работе долот PDC, что следует из результатов деятельности таких компаний как Smits bits, Varel, Backer Hughes, БУРСЕРВИС, Волгабурмаш и др. [7, 9, 10, 11, 13]. Данные компании активно используют аналитику и результаты аналитических исследований при проектировании новых моделей долот с использованием методик компьютерного моделирования, основанных на методах конечных элементов, таких как IDEAS, i-Drill, Yield Point, SPOT™ и др. [7, 10, 11, 13]. Указанные программы постоянно развиваются и совершенствуются, поскольку в них вводятся новые базовые данные и результаты аналитических исследований, учитывающих сложную механику работы современных долот [7].

На основе выполненных ранее исследований работы поликристаллического алмазного реза PDC можно сделать вывод о том, что в этих работах не учтено влияние динамических процессов, а также влияния среды на процесс работы вооружения буровых долот.

На рисунке 1 дана общая схема работы реза PDC из которой следуют основные аналитические выводы о значениях действующих сил, таких как усилие резания-скалывания горной породы  $F_p$ , осевая нагрузка на резец  $P$ , сила трения  $F_{тр}$ , результирующая сила  $R$ , реакции горной породы  $R_B$  и  $F_n$ , а также основные размеры  $и$ , в том числе, глубина борозды разрушения  $h$ .



**Рисунок 1** – Схема процесса-резания скалывания породы резцом PDC.

а – вид на резец спереди; б – вид на резец сбоку;

в – форма и размеры площадок смятия и скалывания породы резцом PDC цилиндрической формы

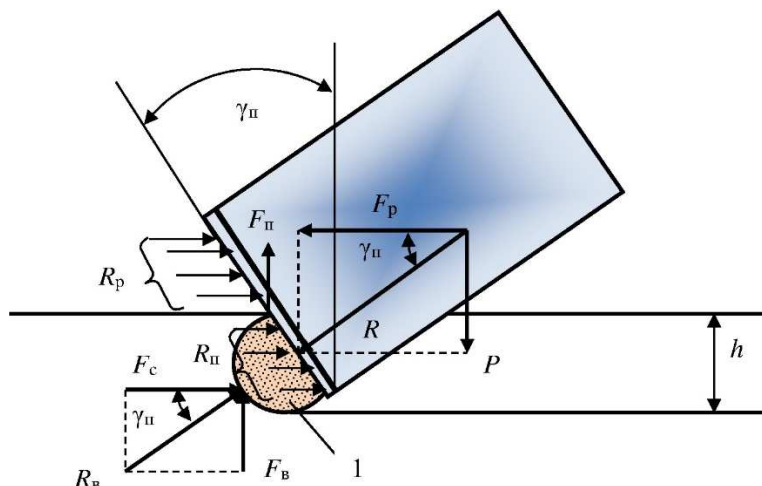
Процесс разрушения горной породы сопровождается деформированием породы в ядре сжатия и вокруг ядра. Поэтому при выводе аналитики необходимо учитывать затраты энергии и сил разрушения на процессы деформирования – смещении слоев, частиц горной породы относительно друг друга, которые способны вызывать очень значительные потери энергии разрушения. Это можно сделать через коэффициент внутреннего трения в деформируемых при разрушении слоях горной породы [7].

Для уточнения влияния среды на процесс работы реза рассмотрим рисунок 2.

Из схемы следует, что на плоскость реза, установленного с отрицательным передним углом –  $\gamma_n$ , заглубленного в породу на глубину  $h$  и движущегося со скоростью  $v_p$  воздействует сопротивление среды – бурового раствора над забоем  $R_p$  и, не полностью разрушенной, горной породы  $R_n$ .

Исходя из условия, что при установившемся режиме резания-скалывания породы резцом PDC усилие  $R$  будет направлено под прямым углом к плоскости реза [6, 7], равнодействующее усилие  $R$ , сил резания скалывания  $F_p$ , и осевого усилия  $P_{ос}$  определим из соотношения:

$$R = \frac{F_p}{\cos \gamma_n} = \frac{P - F_n}{\sin \gamma_n} \tag{1}$$



**Рисунок 2** – Схема для анализа процесса резания-скалывания горной породы резцом PDC:  
1 – ядро сжатия горной породы

Из данной формулы следует, что усилие резания-скалывания породы можно определить из соотношения:

$$F_p = \frac{P - F_n}{\operatorname{tg} \gamma_n}, \tag{2}$$

где  $P_{oc}$  – осевая нагрузка на резец, Н;  $F_n$  – усилие, которое направлено вверх из-за влияния сопротивления среды, вследствие скоростного напора, воздействующей на переднюю поверхность резца, Н;  $\gamma_n$  – передний гол установки резца, град.

В развернутом виде усилие резания-скалывания породы  $F_p$  с учетом реакции среды и затрат усилия на преодоление внутреннего трения будет равно:

$$F_p = S_{ск} \sigma_{ск} \cdot (1 + \operatorname{tg} \varphi) + f (P_{oc} - F_n) + (R_p + R_n), \tag{3}$$

где  $S_{ск}$  – площадь площадки скалывания породы на передней грани резца, м<sup>2</sup>;  $\sigma_{ск}$  – предел прочности породы на скалывание, Па;  $\varphi$  – угол внутреннего трения в деформируемом объеме породы на передней грани резца, град;  $f$  – коэффициент внешнего трения на контакте поверхности резца с горной породой;  $R_p, R_n$  – сопротивление среды (буровой раствор, насыщенный шламом и разрушенную горную породу), через которую движется резец бурового инструмента со скоростью  $v_p$ .

Как следует из формулы (3) усилие  $F_p$  направленно на процесс деформирования породы, на возникающее при этом, внутреннее трение между частицами породы, на внешнее трение и сопротивление среды (сопротивление перемещению резца с учетом отрицательного угла наклона его), которое создает появление усилие  $F_n$ , которое направленно вверх и, таким образом, компенсирует часть осевой нагрузки  $P$  на резец.

Таким образом, рост сопротивления среды при бурении будет требовать более значительного осевого усилия на резец для сохранения глубины резания-скалывания горной породы.

Размер площадки скалывания породы  $S_{ск}$  рассчитываем, как площадь половины эллипса с полуосями  $0,5r$  и  $AB$  в соответствии со схемой на рисунке 1:

$$S_{ск} = 0,5 \pi r AB = 0,5 \pi \sqrt{dh} \frac{h}{\sin \gamma_{ск}}, \tag{4}$$

где  $d$  – диаметр резца, м;  $h$  – глубина внедрения резца в породу, м;  $\gamma_{ск}$  – угол скалывания породы на передней грани резца, град.

После подстановки полученной формулы в формулу (3) определим усилие резание-скалывания породы резцом, с учетом возможности установки резца (см. рис. 2) с поворотом в направлении резания-скалывания породы  $\varphi_p$  (фронтальный угол резания):

$$F_p = \frac{\pi \sigma_{ск} h \sqrt{dh}}{\sin \gamma_n} \cos \varphi_p (1 + \operatorname{tg} \varphi) + f (P_{oc} - F_n) + (R_p + R_n), \tag{5}$$

Усилия  $R_p$  и  $R_n$  определим исходя из фундаментальных зависимостей Бернулли и уравнения Навье-Стокса. Для нашего случая эти выражения будут выглядеть следующим образом:

$$R_p = 0,5 v_p^2 \rho_p S_1 C_c; \tag{6}$$



$$R_n = 0,5v_p^2 \rho_n S_2 C_c, \tag{7}$$

где  $S_1$  и  $S_2$  – площади частей торца резца, взаимодействующие с буровым раствором (выше линии заглабления резца) и разрушаемой горной породой (ниже линии заглабления резца), соответственно, м<sup>2</sup>;  $C_c$  – коэффициент сопротивления со стороны резца, определяемый формой плоскости резца (ориентировочно для плоского 1, для круглого выпуклого 0,5, для вогнутого по дуге окружности 1,5);  $\rho_p, \rho_n$  – весовая плотность бурового раствора, насыщенного шламом и разрушаемой горной породы, Н/м<sup>3</sup>.

Для упрощения формулы (5) и дальнейших выводов из нее, а также инженерных расчетов, целесообразно реакции  $R_p$  и  $R_n$  сопротивлений представить как единую силу, определяющую сопротивление среды со стороны передней грани резца  $R_c = R_p + R_n$ . С этой целью в расчетах можно использовать следующую зависимость:

$$R_c = 0,5v_p^2 \rho_c S C_c, \tag{8}$$

где  $\rho_c$  – весовая плотность среды с учетом плотности бурового раствора, насыщенного шламом из зоны разрушения и разрушаемой горной породы, Н/м<sup>3</sup>;  $S$  – площадь резца или его проекции на линию резания, если угол резания  $\varphi_r$  не равен нулю, а составляет угол более 0 градусов (обычно не более 5–10°).

Весовая плотность среды  $\rho_c$  определяется как средняя величина таких значений как плотность бурового раствора, насыщенного шламом – 11–12 кН/м<sup>3</sup> и плотности разрушаемой горной породы – 20–25 кН/м<sup>3</sup>. Таким образом, ориентировочно  $\rho_c$  может составлять величину 14–18 кН/м<sup>3</sup>.

Усилие  $F_n$  в формуле (5) найдем как проекцию на вертикальную линию усилия  $R_c$  с учетом того, что усилие  $R_c$  проецируется сначала на плоскость резца, установленную под углом  $(-\gamma_n)$ , а затем уже на вертикальную линию (рис. 3).

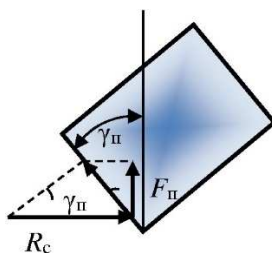


Рисунок 3 – Схема к процессу работы резца PDC

В этом случае усилие  $F_n$  будет равно:

$$F_n = 0,5v_p^2 \rho_c S C_c \sin \gamma_n \cos \gamma_n. \tag{9}$$

Проведя математические преобразования известных формул, например, представив площадь резца  $S = 0,25\pi d^2$  выражение (5) получит следующий вид:

$$F_p = \frac{\pi \sigma_{ск} h \sqrt{dh}}{\sin \gamma_n} \cos \varphi_p (1 + \operatorname{tg} \varphi) + f(P_{oc} - 0,125v_p^2 \rho_c \pi d^2 C_c \sin \gamma_n \cos \gamma_n) + 0,125v_p^2 \rho_c \pi d^2 C_c \cos \gamma_n. \tag{10}$$

Для упрощения восприятия формулу (10) представим несколько иначе:

$$F_p = \frac{\pi \sigma_{ск} h \sqrt{dh}}{\sin \gamma_n} \cos \varphi_p (1 + \operatorname{tg} \varphi) + f(P_{oc} - A \sin \gamma_n) + A, \tag{11}$$

где  $A = 0,125v_p^2 \rho_c \pi d^2 C_c \cos \gamma_n$ .

Какова величина компенсационной силы  $F_n$ , вызванной сопротивлением среды?

Для долота, оснащенного резцами PDC диаметром 15 мм при плотности среды  $\rho_c = 15$  кН/м<sup>3</sup>, линейной скорости 2 м/с и переднем угле 20°,  $F_n$ , воздействующая на один резец будет равна 1,7 Н, при  $v_p = 3$  м/с – 3,8 Н, при  $v_p = 5$  м/с – 10,5 Н.

Если плотность среды принять равной 20 кН/м<sup>3</sup>, то значения усилия  $F_n$ , воздействующая на один резец возрастут до 2,3; 5,1 и 14 Н соответственно при линейной скорости 2 м/с.

Таким образом, для долота, оснащенного 40 резцами, в первом случае компенсационная сила  $F_n$  будет равна 68 Н, 152 Н и 420 Н при линейной скорости 2 м/с.

Если линейная скорость будет 2 м/с, но плотность среды 20 кН/м<sup>3</sup>, то усилия воздействия на инструмент в направлении компенсации осевого усилия будут равны 92, 204 и 560 Н соответственно.



Наиболее существенное влияние на рост усилия  $F_n$  оказывает линейная скорость перемещения резца по забою. Например, если линейная скорость составит 3 м/с, то при плотности среды 15 кН/м<sup>3</sup> усилие  $F_n$  будет равно 153, 342 и 945 Н. При плотности среды 2 кН/м<sup>3</sup> компенсационная сила существенно возрастет до 207, 459 и 1260 Н соответственно.

При линейной скорости  $v_p$  равной 5 м/с, сила  $F_n$  будет равна 425, 950 и 2625 Н при плотности среды 15 кН/м<sup>3</sup>.

Отсюда следует вывод, что величина компенсационного усилия велика и способна оказывать влияние на глубину резания-скалывания породы, особенно при высоком значении линейной скорости  $v_p$ , плотности среды и значительного числа резцов на торце долота, имеющих высокое значение отрицательного переднего угла.

Используя ранее полученное выражение (2) для расчета  $F_p$  можно определить глубину резания-скалывания породы  $h$  из равенства полученных формул (2) и (10).

Глубина резания-скалывания будет равна:

$$h = \sqrt[2]{\left\{ \frac{[(P_{oc} - A \sin \gamma_n)(1 + f \operatorname{tg} \gamma_n) + A t g \gamma_n] \sin \gamma_{ck}}{\pi \sigma_{ck} \sqrt{d} \operatorname{tg} \gamma_n \cos \varphi_p (1 + \operatorname{tg} \varphi)} \right\}^3}, \tag{12}$$

где  $A = 0,125 v_p^2 \rho_c \pi d^2 C_c \cos \gamma_n$ .

Из полученной формулы следует ряд важных выводов о влиянии на глубину резания-скалывания породы резцом PDC таких параметров, как:

- передний угол резца  $\gamma_n$ ;
- угол поворота резца относительно направления резания-скалывания породы  $\varphi$ ;
- скорости резания-скалывания породы, определяемой как линейная скорость резца на забое скважины  $v_p^2$ .

Как следует из формулы (12) повышение переднего отрицательного угла  $\gamma_n$  приводит к снижению глубины резания-скалывания породы за счет компенсации части осевого усилия реакцией среды (разрушаемой горной породы и бурового раствора, насыщенного образующимся шламом). Повышение угла поворота резца  $\varphi$  приводит к увеличению глубины резания-скалывания  $h$ , так как снижается сопротивление резанию-скалыванию породы из-за уменьшения ширины борозды разрушения. Увеличение диаметра резца  $d$  снижает глубину резания-скалывания породы  $h$ .

Важным и новым в формуле (12) является рассмотрение влияния линейной скорости резания-скалывания на глубину борозды разрушения.

Полученная зависимость (12) может использоваться при проектировании буровых долот с резцами PDC, для которых важным условием равномерного изнашивания резцов является равномерность резания-скалывания всеми резцами, расположенными в разных точках торцевой поверхности долота [6, 7]. Например, поскольку известно, что скорость перемещения резца при резании-скалывании породы существенно влияет на глубину его внедрения, можно с учетом полученной аналитической зависимости (12) определить рациональную схему установки резцов на торце долота.

Линейная скорость резания-скалывания в зависимости от радиуса  $r$  траектории резца (рис. 4), размещенного на торце долота и частоты вращения долота  $\omega$  определяется выражением:

$$v_n = 2\pi\omega r. \tag{13}$$

На рисунке 4 показаны схемы распределения скоростей резания-скалывания резцами долота и установки резцов на торце долота.

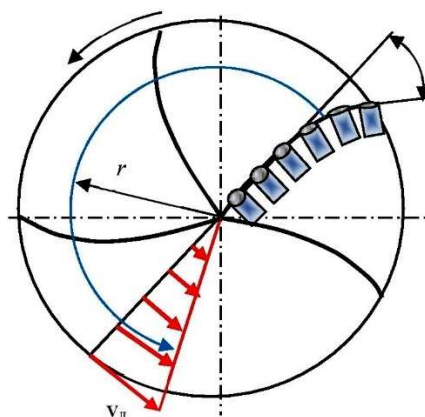


Рисунок 4 – Схема установки резцов на торце долота с учетом скоростей резания-скалывания породы



Из приведенных зависимости и схем следует, что если линейная скорость в центральной точке торца долота равна нулю, то, например, для долота диаметром 190,5 мм (0,1905 м) при частоте вращения долота  $300 \text{ мин}^{-1}$  ( $5 \text{ с}^{-1}$ ) линейная скорость резца, размещенного на внешнем радиусе торца долота, будет равна 3 м/с.

Если диаметр долота 250,8 мм (0,2508 м), то при том же значении частоты вращения линейная скорость будет равна около 4 м/с.

В результате такого распределения скоростей резания-скалывания резцы долота, размещенные ближе к наружному диаметру, будут иметь меньшее заглабление в породе, что следует из формулы (12), чем резцы, размещенные ближе к центру торца долота, так как испытывают повышенное сопротивление резанию-скалыванию породы, которое, как известно, растет с увеличением линейной скорости перемещения резца. Таким образом, можно отметить на первый взгляд парадоксальный факт: резцы долота, размещенные на различных линиях резания-скалывания, осуществляя разрушение одной и той же горной породы, испытывают различное сопротивление резанию-скалыванию.

Для решения задачи выравнивания условий и глубины резания-скалывания породы, когда все резцы на торце долота будут работать в условиях равного сопротивления резанию-скалыванию, при их расстановке на торце долота целесообразно использовать следующие общие технические предложения, которые следуют из формулы (12):

- диаметр резцов может уменьшаться (при равной величине выпуска резцов) в направлении от центра торца к его периферии;
- возможно активное варьирование величиной переднего угла для выравнивания глубиной равновесного резания-скалывания горной породы;
- угол поворота резца  $\varphi_r$  может изменяться в пределах  $0-10^\circ$  и увеличиваться в направлении от центра к периферии торца.

При этом важны следующие рекомендации при выборе схемы установки резцов.

Передний отрицательный угол  $\gamma_n$  может снижаться только до нулевого значения и не переходить в область положительных значений, так как это негативно скажется на стойкости резцов, особенно при бурении твердых, трещиноватых горных пород, горных пород с включением более твердых обломков, конгломератов и брекчий вследствие повышения динамического характера разрушения породы, поскольку величина ударного импульса, воспринимаемого резцом, пропорциональна косинусу переднего угла установки резца ( $\cos \gamma_n$ ), а значит, по мере повышения переднего угла вероятность скола резца при ударе о борт трещины или твердое включение в породе снижается.

При проектировании долота следует учитывать такие важные обстоятельства, как тип горной породы и планируемый режим частоты вращения, для которого проектируется долото. В качестве параметра, характеризующего буримость горных пород, следует определить сопротивление горной породы на резание-скалывание при различных значениях скорости приложения разрушающего усилия или усилия резания-скалывания породы [6, 7].

Подтверждением связи линейной скорости резания-скалывания породы с глубиной формируемой борозды разрушения могут быть результаты опытного бурения различными типами бурового инструмента [7].

Например, результаты бурения долотом PDC песчаника показали следующую модель, полученную обработкой данных по методике полного факторного эксперимента:

$$h_{об} = 0,82 + 0,63P - 0,072\omega - 0,05 P\omega, \quad (14)$$

где  $P$  – осевая нагрузка на долото;  $\omega$  – частота вращения долота.

Из формулы следует (14) следует, что рост частоты вращения  $\omega$  снижает углубление за один оборот инструмента на забое скважины.

## Выводы

1. Получена зависимость расчета глубины резания-скалывания горной породы резцами типа PDC с учетом линейной скорости перемещения резца и влияния не только разрушаемой горной породы, но среды, а именно сопротивления со стороны бурового раствора насыщенного шламом и разрушенной горной породы, находящейся перед резцом.

2. Расчеты показывают, что сопротивление среды может быть значительным и приводит к уменьшению глубины борозды разрушения горной породы.

3. Поскольку резцы, расположенные на торце долота имеют различную линейную скорость в зависимости от места их расположения относительно центра торца, при проектировании вооружения бурового инструмента важно учитывать сопротивление для каждой группы резцов для выравнивания действующих сопротивлений на резцы, что обеспечит более равномерное нагружение и напряжения в материале резцов, а значит и более высокий ресурс.





4. Полученная аналитическая база может использоваться при проектировании долот с целью получения более совершенных конструкций бурового инструмента.

### Литература

1. Башкатов Д.Н. Обоснование угла установки резцов в долотах лопастного типа // Инженер-нефтяник. – 2010. – № 3. – С. 21–24.
2. Новый взгляд на режущие элементы буровых долот / А. Бессон [и др.] // Нефтегазовое обозрение. – 202. – 26 с.
3. Сверхтвердые материалы в геологоразведочном инструменте / Р.К. Богданов, А.П. Загора, А.М. Исонкин [и др.]. – Екатеринбург : изд-во УГГГА, 2003. – 138 с.
4. Борисов К.И. Научный метод оценки эффективности процессов динамического разрушения горных пород при бурении скважин современными инструментами режуще-скалывающего действия : дисс. ... д-ра наук по специальности 25.00.14. – Технология и техника геологоразведочных работ. – Томск, 2012. – 197 с.
5. Борисов К.И. Современные методы оценки сопротивления горных пород резанию-скалыванию при бурении долотами PDC : монография. – ТПУ, 2013. – 166 с.
6. Нескромных В.В., Борисов К.И. Аналитическое исследование процесса резания-скалывания горной породы долотом с резцами PDC // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 1. – С. 191–195.
7. Нескромных В.В. Разрушение горных пород при бурении скважин : учебное пособие. – М. : ИНФРА-М; Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2015. – 336 с.
8. Ресурсосберегающая технология алмазного бурения в сложных геологических условиях / Н.В. Соловьев [и др.]. – М. : Изд-во ВНИИОЭНГ, 1997. – 329 с.
9. ОАО «Волгабурмаш»: надежный сервис для любых условий бурения [Электронный ресурс] // Бурение и нефть. – 2013. – № 6. – URL : <http://www.burneft.ru/archive/issues/2013-06/5>
10. Varel International. Каталог продукции [Электронный ресурс]. – URL : <http://www.varelintl.com/ru/Oil-and-Gas/PDC-Drill-Bits/>
11. Product Catalog. Smith Bits. A Schlumberger Company. 17-BDT-310907 Copyright 2018 Schlumberger. All rights reserved.
12. Saksala T. 3D numerical modelling of bit-rock fracture mechanisms in percussive drilling with a multiplebutton bit // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. – 2013. – P. 309–324.
13. Smith. Каталог продукции. – С. 24–30.

### References

1. Bashkatov D.N. Justification of the cutter installation angle in the blade type bits // Petroleum engineer. – 2010. – № 3. – P. 21–24.
2. New look at the drilling bit cutting elements / A. Besson [et al.] // Oil-gas review. – 202. – 26 p.
3. Superhard materials in an exploration tool (in Russian) / R.K. Bogdanov, A.P. Zakora, A.M. Isonkin [et al.]. – Yekaterinburg : edition of UGGGA, 2003. – 138 p.
4. Borisov K.I. Scientific method of estimation of efficiency of processes of dynamic destruction of rocks at well drilling by modern tools of cutting and slitting action: Dissertation for a scientific degree of the doctor of sciences on a speciality 25.00.14. – Technology and technique of prospecting works. – Tomsk, 2012. – 197 c.
5. Borisov K.I. Modern methods of estimation of resistance of rocks to cutting-sliding at drilling by PDC bits : a monograph. – TPU, 2013. – 166 p.
6. Neskromnykh V.V., Borisov K.I. Analytical study of rock cutting and slipping with PDC bits // Izvestia Tomsk Polytechnic University. – 2013. – V. 323. – № 1. – P. 191–195.
7. Neskromnykh V.V. Destruction of rocks at well drilling : a textbook. – M. : INFRA-M; Krasnoyarsk : Siberian Federal University, 2015. – 336 p.
8. Resource-saving technology of diamond drilling in complex geological conditions / N.V. Soloviev [et al.]. – M. : VNIIOENG Publishing House, 1997. – 329 p.
9. OJSC Volgaburmash: reliable service for any drilling conditions [Electronic resource] // Drilling and oil. – 2013. – № 6. – URL : <http://www.burneft.ru/archive/issues/2013-06/5-06/5>
10. Varel International. Product catalog [Electronic resource]. – URL : <http://www.varelintl.com/ru/Oil-and-Gas/PDC-Drill-Bits/>
11. Product Catalog. Smith Bits. A Schlumberger Company. 17-BDT-310907 Copyright 2018 Schlumberger. All rights reserved.
12. Saksala T. 3D numerical modelling of bit-rock fracture mechanisms in percussive drilling with a multiplebutton bit // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. – 2013. – P. 309–324.
13. 13. Smith. Product Catalogue. – P. 24–30.