

УДК 622.24.051.64

## ВЛИЯНИЕ СИЛ СОПРОТИВЛЕНИЯ НА ГЛУБИНУ РЕЗАНИЯ–СКАЛЫВАНИЯ ГОРНОЙ ПОРОДЫ АЛМАЗНЫМ РЕЗЦОМ

Нескоромных Вячеслав Васильевич<sup>1</sup>,  
sovair@bk.ru

Попова Марина Сергеевна<sup>1</sup>,  
alleniram83@mail.ru

Харитонов Антон Юрьевич<sup>2</sup>,  
ant.kharitonov@gmail.com

<sup>1</sup> Сибирский федеральный университет,  
Россия, 660095, г. Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 95.

<sup>2</sup> ООО «Витэк-Автоматика»,  
Россия, 198035, г. Санкт-Петербург, Набережная реки Фонтанки, 170.

**Актуальность.** Разработка бурового породоразрушающего инструмента всегда нацелена на повышение эффективности и ресурса его работы, а также на расширение области его применения. Важной составляющей данного процесса является изучение механизма разрушения горной породы рабочей частью разрабатываемого инструмента. Самым сложным, но важным является исследование глубины резания–скальвания горной породы резцом. Несмотря на мелкие габариты рассматриваемой системы, для более достоверного результата необходимо учитывать все факторы, влияющие на процесс разрушения горной породы резцом. Если говорить о наиболее весомых факторах, которые оказывают влияние на эффективность разрушения горной породы, необходимо отметить силы сопротивления, возникающие на забое скважины. Самым мелким резцом обладает алмазный породоразрушающий инструмент. Алмазный тип бурового инструмента является довольно востребованным в производстве. В связи с этим актуальным является развитие теории и возможностей исследования механизма разрушения горной породы алмазным резцом с учетом возникающих на забое процессов и явлений, в том числе и прелетающих внедрению его в породу.

**Цель:** выявление возможных источников сил сопротивления внедрению алмазного резца в горную породу; определение степени влияния сил сопротивления и других факторов на величину глубины резания–скальвания породы алмазным резцом.

**Объекты:** механизм разрушения горной породы единичным алмазным резцом.

**Методы:** экспериментальные, аналитические исследования, анализ, метод компьютерного моделирования.

**Результаты.** Разработан программный продукт, позволяющий детально исследовать механизм разрушения горной породы единичным алмазным резцом. Определено, что сопротивление со стороны среды, возникшей на забое скважины, оказывает влияние на результирующую величину глубины резания–скальвания горной породы алмазным резцом. Величина результирующей силы сопротивления резцу зависит от вида промывочной жидкости и типа разрушаемой горной породы. Выявлено, что по мере роста линейной скорости перемещения резца наблюдается рост сопротивления горной породы и снижение глубины внедрения резца в горную породу.

### Ключевые слова:

Буровой инструмент, механизм разрушения, алмазный резец, сила сопротивления, моделирование.

### Введение

Направление современного проектирования бурового породоразрушающего инструмента непосредственно связано с повышением эффективности, ресурса работы и расширением области его применения [1–22]. Компьютерное моделирование обладает большими возможностями в научном исследовании различных процессов [15–30] и на данный момент остается востребованным методом в том числе и в области разработки породоразрушающего инструмента.

Разработка бурового породоразрушаемого инструмента начинается с исследования механизма разрушения горной породы его рабочей поверхностью. В ранее проведенных работах [1–14, 19, 20, 27, 28] доказано, что на результат использования породоразрушающего инструмента оказывает влияние целая система факторов.

Основным разрушающим породу элементом бурового инструмента является резец. В бурении известны

различные виды резцов, отличающиеся составом, прочностными характеристиками, формой, размерами, назначением и т. д. Один и тот же резец может выполнять различные функции в зависимости от его местоположения и геометрии расположения в породоразрушающем инструменте.

Поэтому в основном исследованию подвергается тип, форма, размер, геометрия установки резца в буровом инструменте, а также тщательно изучаются процессы и явления, влияющие на эффективность разрушения породы конкретным резцом или группой резцов.

Изучение разрушения горной породы одним резцом затруднено его небольшими размерами. Размеры резцов современного востребованного, особенно алмазного, бурового инструмента зачастую не превышают 1 мм. При этом процессы, которые протекают в пределах такого элемента, в значительной степени влияют на общий результат бурения. Использование компьютерного моделирования позволяет без затруд-

нений, точно и наглядно исследовать мелкогабаритные системы [5, 9, 10, 11, 13, 15–28], что является преимуществом использования его при проектировании бурового породоразрушающего инструмента и дает возможность развития научной теории в области разрушения горной породы [5, 6, 10, 13, 19, 27, 28].

#### Постановка проблемы

Как известно [1–14, 16–18, 20], при бурении область разрушения горной породы отличается от величины внедрения в нее алмазного резца. Причем величина глубины резания–скалывания породы алмазом колеблется в зависимости от многих факторов процесса бурения.

Основной силой, способствующей внедрению алмазного резца в породу, является результирующее усилие ( $R$ ) (рис. 1), возникающее в результате действия осевого и тангенциального усилий. Идеальным случаем эффективного разрушения забоя является полная реализация приложенных к резцу сил. Однако резец испытывает неизбежное сопротивление со стороны забоя. Помимо известного сопротивления со стороны неразрушенного горного массива, на резец оказывает воздействие образовавшаяся на забое жидкая среда. Такая среда состоит из промывочного агента и шлама, т. е. является плотным веществом, подверженным гидродинамике процесса бурения.

#### Методика

Рассмотрим воздействие всех, описанных выше, сил на алмазный резец по схеме, приведенной на рис. 1. Противодействующими внедрению резца в породу силами являются: усилие  $F_n$ , направленное навстречу осевому усилию;  $R_c$ , являющееся результатом течения промывочного агента;  $R_n$  – сопротивление рыхлой породы, находящейся под ядром сжатия.

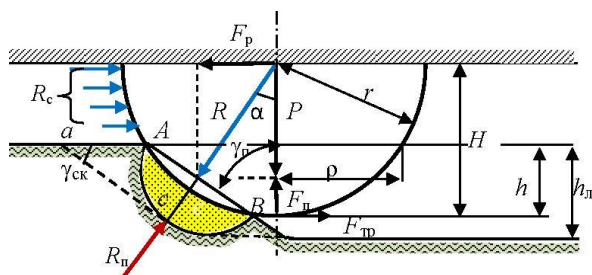


Рис. 1. Схема исследования внедрения алмазного резца в горную породу

Fig. 1. Diagram for studying rock destruction with a diamond cutter

Как следует из анализа схемы механизма разрушения горной породы алмазным резцом, формула для расчета усилия резания–скалывания, с учетом проведенных ранее аналитических преобразований [12], будет выглядеть следующим образом:

$$F_p = \frac{\pi(h + 0,25\sqrt{dh})^2 \sigma_{ск} (1 + \operatorname{tg}\varphi_n)}{2\operatorname{tg}\gamma_{ск}} + f(P - F_n) + R_c \cos\gamma_n, \quad (1)$$

где  $h$  – глубина внедрения алмаза в горную породу, м;  $d$  – диаметр алмазного резца, м;  $\sigma_{ск}$  – предел прочности на скалывание горной породы, Па;  $\varphi_n$  – угол внутреннего трения в деформируемых объемах породы перед передней гранью резца, град;  $\gamma_{ск}$  – угол скалывания горной породы перед передней гранью резца, град;  $f$  – коэффициент трения алмазного резца о горную породу в условиях присутствия среды;  $P$  – осевая нагрузка на резец, Н;  $F_n$  – усилие, вызванное сопротивлением среды, направленное навстречу осевому усилию, Н;  $F_{тр}$  – сила трения алмазного резца о породу в условиях присутствия среды, Н;  $R_c$  – сопротивление среды, Н;  $\gamma_n$  – передний угол резца, град.

При этом усилие резания–скалывания горной породы можно представить несколько иначе:

$$F_p = \frac{(P - F_n)}{\operatorname{tg}\gamma_n}, \quad (2)$$

где усилие, направленное навстречу осевому усилию,  $F_n$  (рис. 1) определяется по формуле:

$$F_n = R_c \sin\gamma_n \cos\gamma_n. \quad (3)$$

В формуле (3) сопротивление среды можно считать по известной формуле Бернулли для скоростного напора

$$R_c = 0,5v_p^2 C_c \rho_c S \quad (4)$$

и формуле для расчета площади передней поверхности резца

$$S = 0,125\pi dH,$$

где  $v_p^2$  – линейная скорость перемещения резца, м/с;  $C_c$  – коэффициент формы резца (ориентировочно может изменяться от 1 – плоский резец, до 0,5 – приостренный, ориентированный гранью вперед);  $\rho_c$  – весовая плотность среды, Н/м<sup>3</sup>;  $S$  – площадь передней поверхности резца, м<sup>2</sup>;  $H$  – выпуск алмаза из матрицы, м.

С учетом площади контактирующего со средой резца, формула расчета реакции будет выглядеть следующим образом

$$R_c = 0,0625v_p^2 C_c \rho_c \pi dH. \quad (5)$$

Если принять, что  $v_p = 2\pi\omega r$ , то по формуле (5) можно определить сопротивление среды в зависимости от частоты вращения бурового инструмента  $\omega$  и радиуса торца коронки  $r$  – расстояния от центра торца до точки установки алмазного резца:

$$R_c = 0,25\pi^3\omega^2 r^2 C_c \rho_c dH.$$

Решение уравнений (1) и (2) для определения усилия резания–скалывания горной породы резцом  $F_p$  позволило получить следующее выражение:

$$\frac{\pi(h + 0,25\sqrt{dh})^2 \sigma_{ск}}{2\operatorname{tg}\gamma_{ск}} (1 + \operatorname{tg}\varphi_n) + f(P - R_c \sin\gamma_n \cos\gamma_n) + R_c \cos\gamma_n - \frac{(P - R_c \sin\gamma_n \cos\gamma_n)}{\operatorname{tg}\gamma_n} = 0,$$

учитывающее многие факторы исследуемой системы, а именно схемы разрушения горной породы алмазным резцом с учетом геометрических параметров, внешних силовых, а также характеристик разрушаемой породы.

После преобразований имеем:

$$\frac{\pi(h + 0,25\sqrt{dh})^2 \sigma_{ск}}{2tg\gamma_{ск}} (1 + tg\varphi_{п}) + R_c \cos\gamma_{п} + (P - R_c \sin\gamma_{п} \cos\gamma_{п}) \left( f - \frac{1}{tg\gamma_{п}} \right) = 0. \quad (6)$$

Для дальнейшего исследования, математического преобразования сложного выражения, проверки адекватности получаемых результатов и предложенной математической модели в среде графического программирования *LabVIEW* [23–26] разработан программный продукт *Burienie\_almazom03.avi*. Опыт применения компьютерного моделирования разрушения горной породы в среде *LabVIEW* [28] показал, что данный метод исследования дает довольно достоверные и точные результаты.

Полученная программа реализует всесторонний расчет описанной математической модели: учитывает размеры алмазного резца, переводит все размерности исходных данных в систему СИ и, реализуя алгоритм вычислений формул (1)–(6), определяет глубину резания породы алмазом с учетом силы сопротивления образовавшейся на забое среды.

Для полной картины разрушения горной породы алмазом, помимо глубины резания, необходимо также рассматривать размеры и направление распространения зоны предразрушения, которая указывает на возможную область разрушения горной породы алмазным резцом. Для этого в программу заложен расчет глубины проникновения ядра сжатия породы в направлении действия осевой силы, т. е. глубины борозды разрушения, определяемой по формуле (7):

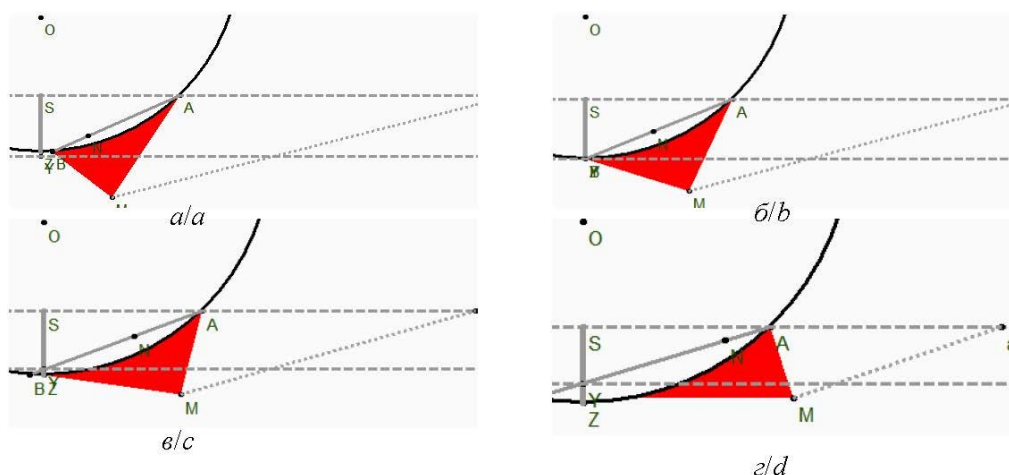
$$h_{л} = 0,25 \cos\alpha (2h + \sqrt{dh}), \quad (7)$$

а также глубины проникновения ядра сжатия в направлении действия результирующей осевого и тангенциального усилий, действующих на алмаз, которую можно найти по формуле (8):

$$MN = 0,25(2h + \sqrt{dh}). \quad (8)$$

Такая программа позволяет исследовать механизм разрушения породы алмазами различного размера при заданном (или предполагаемом) выпуске алмаза и различных показателях осевого и тангенциального усилий с учетом сопротивления среды, образовавшейся на забое скважины. При этом учитываются различные свойства разрушаемой породы. Программа позволяет исследовать такие труднодоступные для производственного эксперимента процессы, как механизм разрушения породы одним алмазом, размер которого может достигать десятые доли миллиметра, а площадь разрушения породы не превышает 1 мм<sup>2</sup>.

К примеру, при бурении в известняке ( $\sigma_{ск}=19$  МПа) инструментом, армированным алмазом диаметром 0,9 мм, при осевой нагрузке  $P=5$  Н и скорости резания  $v_0=3$  м/с, перебирая значения тангенциального усилия, можно наблюдать изменение направления ядра сжатия и выбрать из ряда оптимальное значение для эффективного бурения в предложенных условиях (рис. 2). *Burienie\_almazom03.avi*. производит моментальный расчет, строит схему взаимодействия алмазного резца с породой (рис. 2) и выводит ее на экран. Так, оптимальным для исследуемых условий будет значение тангенциального усилия в пределах от 4 до 7 Н. В этом случае ядро сжатия располагается перед передней гранью алмаза (рис. 2, в), что приводит к скалыванию и резанию горной породы, а учитывая твердость известняка, – такое расположение сил способствует более эффективному его разрушению.



**Рис. 2.** Результаты компьютерного моделирования механизма разрушения известняка алмазом 0,9 мм при осевом усилии 5 Н: а)  $F_m=2$  Н; б)  $F_m=3$  Н; в)  $F_m=4$  Н; г)  $F_m=6$  Н

**Fig. 2.** Results of computer simulation of the mechanism of limestone destruction by 0,9 mm diamond with axial force 5 H: а)  $F_m=2$  Н; б)  $F_m=3$  Н; в)  $F_m=4$  Н; г)  $F_m=6$  Н

#### Анализ

Полученные результаты компьютерного моделирования подтверждают выводы, сделанные в исследованиях [12], что указывает на адекватность пред-

ложенной математической модели и позволяет использовать ее для дальнейшего изучения особенностей механизма разрушения горной породы алмазным резцом.

Результаты компьютерного моделирования показали, что среда, образовавшаяся из смеси промывочного агента и шлама на забое, оказывает влияние на величину глубины резания–скалывания алмазом. На изменение реакции сопротивления среды оказывает влияние ее плотность и скорость резания. На плотность, соответственно, влияют тип промывочного агента и вид разрушаемой горной породы. Скорость резания–скалывания в свою очередь определяется частотой вращения породоразрушающего инструмента и местоположением исследуемого алмаза. К тому же, немаловажной является форма алмазного резца и геометрические параметры его установки в породоразрушаемом инструменте.

Особенностью круглого резца, к примеру, является то, что передний его угол постоянно может меняться при изменении глубины погружения резца в горную породу. Ориентировочно передний угол можно определить по зависимости (9):

$$\gamma_n = 90 - \alpha, \quad (9)$$

где  $\alpha$  – угол между векторами резания–скалывания (рис. 1) горной породы резцом, град.

Более точно, с учетом глубины внедрения резца в горную породу, передний угол резца можно определить по формуле (10):

$$\gamma_n = 90 - 0,5 \arccos \frac{r - h_{yn}}{r}, \quad (10)$$

где  $h_{yn}$  – глубина внедрения алмаза в породу при статическом вдавливании, определяется по формуле (11).

$$h_{yn} = r - \sqrt{r^2 - \frac{P}{\pi p_m (1 + \operatorname{tg} \varphi)}}, \quad (11)$$

где  $p_m$  – твердость горной породы.

Для более точного решения можно использовать формулу с учетом силы  $R_c$ , выталкивающей резец из породы, и это выражение уже будет достаточно близко к значению внедрения алмаза в породу в процессе резания–скалывания, т. е. в динамике:

$$h = r - \sqrt{r^2 - \frac{P - 0,0625 v_p^2 C_p \rho_c \pi d H \sin \gamma_n \cos \gamma_n}{\pi p_m (1 + \operatorname{tg} \varphi)}}. \quad (12)$$

Для расчета величины переднего угла резца важно определить угол  $\alpha$ , который указывает направление действия результирующей силы  $R$ . Для резцов разной формы (необработанный, с острыми гранями, овализованный, полированный) значения угла  $\alpha$  определены на основании экспериментальных данных ВИТРа, приведенных в работе [14], в которой представлены значения, позволяющие рассчитать данный угол. Данные из работы [14] приведены в таблице.

**Таблица.** Усилия, возникающие при работе алмазных резцов разной степени обработки (результаты опытного эксперимента)

**Table.** Results of the experimental determination of efforts during the work of diamond tools

Порода/Rock	Алмаз необработанный/Rough diamond				
	Нагрузка на алмаз Diamond load $P$ , даН	Сила трения Friction force $F_{тр}$ , даН	Тангенциальное усилие Tangential force $F_p$ , даН	$\frac{P}{F_p}$	$\frac{F_{тр}}{F_p}$
<i>Средней твердости/Medium hard</i> Мрамор/Marble Известняк/Limestone Сланец/Slate	8,2	3,7	7,05	1,16	0,53
	6,13	2,76	3,78	1,62	0,73
	3,99	1,8	2,98	1,34	0,61
<i>Твердые и очень твердые/Hard and very hard</i> Альбитофир/Albitofire Роговик/Horn Роговик магнетитовый/Magnetite horn Гранит/Granite	5,27	2,36	3,7	1,42	0,64
	5,34	2,5	2,62	2,04	0,95
	4,8	2,16	2,52	1,89	0,86
	3,96	1,78	2,21	1,8	0,81
<i>Средней твердости/Medium hard</i> Мрамор/Marble Известняк/Limestone Сланец/Slate	Алмаз овализованный/Ovalized diamond				
	2,71	1,21	2,45	1,1	0,49
	6,24	2,8	3,84	1,62	0,73
<i>Твердые и очень твердые/Hard and very hard</i> Альбитофир/Albitofire Роговик/Horn Роговик магнетитовый/Magnetite horn Гранит/Granite	6,1	2,74	4,0	1,52	0,69
	7,78	3,5	6,56	1,18	0,53
	6,18	2,78	4,35	1,42	0,64
	5,13	2,3	2,72	1,89	0,85
<i>Средней твердости/Medium hard</i> Мрамор/Marble Известняк/Limestone Сланец/Slate	Алмаз полированный/Polished diamond (расчетные данные при коэффициенте трения 0,056) (calculated data with friction coefficient 0,056)				
	6,52	2,94	3,84	1,9	0,86
	2,71	0,15	1,39	1,95	0,11
<i>Твердые и очень твердые/Hard and very hard</i> Альбитофир/Albitofire Роговик/Horn Роговик магнетитовый/Magnetite horn Гранит/Granite	6,24	0,35	1,39	4,5	0,25
	6,1	0,34	1,6	3,8	0,21
	7,78	0,43	3,49	2,23	0,12
	6,18	0,35	1,92	3,2	0,18
	5,13	0,29	0,71	7,1	0,41
	6,52	0,37	0,8	8,15	0,46

Из расчетов, с использованием данных из таблицы, следует, что среднее значение отношения осевого и тангенциального усилий ( $P/F_p$ ) для алмазов различного вида обработки неодинаково. Так, для необработанного алмаза такое отношение составляет 1,37 в случае бурения и 1,79 в твердых породах. В случае использования овалированного алмаза  $P/F_p=1,41$  (в породах средней твердости) и  $P/F_p=1,6$  (в твердых породах). Для полированного алмаза  $P/F_p=2-4$  (в породах средней твердости) и  $P/F_p=7-8$  (в твердых и крепких породах), что существенно выше, чем с овалированными и необработанными алмазами.

Таким образом, угол  $\alpha$ , который образуется между вектором осевого  $P$  и результирующего усилий  $R$  (рис. 3) будет следующим:

- для необработанного, а также овалированного алмазов  $33-39^\circ$  (при бурении в горных породах средней твердости) и  $30^\circ$  (при бурении в породах твердых и крепких);
- для полированных алмазов  $14-26^\circ$  (при бурении пород средней твердости) и  $7-8^\circ$  (в более твердых породах) [12].

В процессе работы породоразрушающего инструмента с необработанными или овалированными алмазами в качестве резцов ядро сжатия породы располагается на передней грани такого резца, что способствует скалыванию и резанию породы средней твердости.

При использовании полированного алмаза, в процессе разрушения твердых и крепких горных пород, ядро сжатия смещается под резец (рис. 3, б), что соответствует раздавливанию такой породы. За счет увеличения угла  $\alpha$  происходит смещение ядра сжатия на переднюю грань резца при бурении пород средних по твердости. Такое смещение дает возможность скалыванию породы, хотя при этом порода по-прежнему преимущественно разрушается раздавливанием.

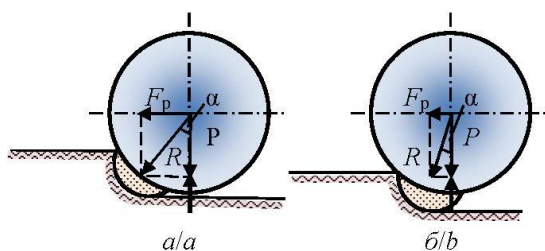


Рис. 3. Схемы взаимодействия алмазных резцов с породой: а) овалированного; б) полированного

Fig. 3. Schemes of interaction of diamond cutters with rock: a) ovalized; b) polished

На рис. 4 представлены графики зависимости сопротивления среды  $R_c$  при плотности среды  $1,5 \text{ г/см}^3$  (зависимость (5)) от линейной скорости перемещения резца для различных диаметров резца. Выпуск резца из матрицы  $H$  определялся как  $1/3$  диаметра резца.

Анализ полученных зависимостей показывает, что при линейной скорости в пределах  $1-5 \text{ м/с}$  сопротивление среды может достигать существенного влияния. Выбранные значения линейных скоростей соответствуют частоте вращения буровых алмазных коронок диаметром от  $46$  до  $93 \text{ мм}$  в пределах  $1000-1500 \text{ мин}^{-1}$ .

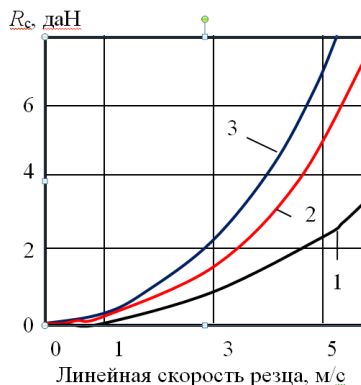


Рис. 4. Зависимость сопротивления среды от линейной скорости резца при диаметре резца (мм): 1 – 2; 2 – 4; 3 – 6

Fig. 4. Dependence of the medium resistance on the linear speed of the cutter with the diameter of the cutter (mm): 1 – 2; 2 – 4; 3 – 6

На рис. 5 для тех же условий, что использованы при построении графиков на рис. 3, представлены зависимости величины выталкивающей силы (формула (3)), вызванной сопротивлением среды, от линейной скорости перемещения резцов.

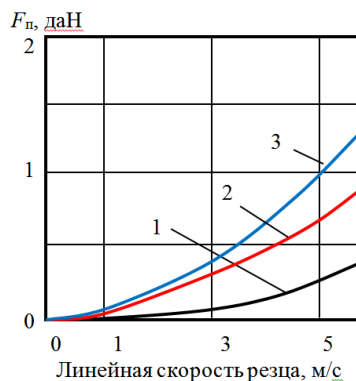


Рис. 5. Зависимость усилия  $F_n$  от линейной скорости резца при диаметре резца (мм): 1 – 2; 2 – 4; 3 – 6

Fig. 5. Dependence of the force  $F_n$  on the linear speed of the cutter with the diameter of the cutter (mm): 1 – 2; 2 – 4; 3 – 6

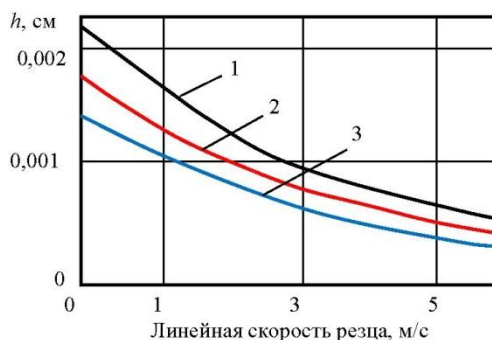


Рис. 6. Зависимость глубины внедрения резца в горную породу от линейной скорости перемещения резца диаметром (мм): 1 – 2; 2 – 4; 3 – 6

Fig. 6. Dependence of the cutter penetration depth into the rock on the linear speed of the cutter movement. Cutter diameter (mm): 1 – 2; 2 – 4; 3 – 6

С учетом влияния силы сопротивления среды и роста сопротивления горной породы по мере роста линейной скорости перемещения резца наблюдается снижение глубины внедрения резца в горную породу, что следует из формулы (12) и результатов компьютерного моделирования. На рис. 6 представлены графические зависимости, полученные по формуле (12) и при использовании данных, по которым получены графики на рис. 4 и 5.

#### Выводы

1. Компьютерное моделирование – надежный метод исследования механизма разрушения горной породы мелким резцом, в том числе алмазным. Такой метод позволяет достоверно изучать мелкогабаритные системы взаимодействия одного алмаз-

ного зерна с горной породой с учетом всех процессов, сопутствующих бурению скважин.

2. На величину глубины резания–скалывания породы алмазным резцом оказывает значительное влияние сопротивление среды, образовавшейся на забое скважины и состоящей из промывочной жидкости и разрушенной горной породы.
3. Степень влияния сопротивления среды на величину глубины резания–скалывания горной породы алмазным резцом зависит от типа промывочного агента, вида разрушаемой породы, формы и геометрии установки резца, а также от скорости перемещения резца.
4. С ростом линейной скорости перемещения резца наблюдается снижение глубины внедрения резца в горную породу.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ларин А.А. Исследование процесса взаимодействия алмазного породоразрушающего инструмента с анизотропной горной породой с целью выявления закономерностей естественного искривления скважин: дис. ... канд. наук. – Томск, 2000. – 192 с.
2. Пушмин П.С. Обоснование модели алмазной коронки на основе исследования механики разрушения твердых анизотропных пород: дис. ... канд. наук. – Иркутск, 2006. – 131 с.
3. Принципы конструирования и эксплуатации алмазного породоразрушающего инструмента / А.А. Буканов, Л.К. Горшков, А.И. Осецкий, Н.В. Соловьев // Разведка и охрана недр. – 2013. – № 7. – С. 44–49.
4. Горшков Л.К., Осецкий А.И. Развитие принципов конструирования и эксплуатации нового алмазного породоразрушающего инструмента // Записки Горного института. – 2012. – Т. 197. – С. 40–45.
5. Huang H., Lecampion B., Detournay E. Discrete element modeling of tool-rock interaction I: Rock cutting // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. – 2013. – V. 37 (13). – P. 1913–1929.
6. Brook B. Principles of diamond tool technology for sawing rock // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2002. – V. 39 (1). – P. 41–58.
7. Инновационные подходы к конструированию высокоэффективного породоразрушающего инструмента / А.Я. Третьяк, В.В. Попов, А.Н. Гроссу, К.А. Борисов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 8 – С. 225–230.
8. Евсеев В.Д., Мавлютов М.Р. Пути повышения эффективности разрушения горных пород // Материалы региональной конференции геологов Сибири, Дальнего Востока и Северо-Востока России. – Томск, 2000. – Т. I. – С. 463–464.
9. Механико-математическое и экспериментальное моделирование устойчивости скважин в анизотропных геосредах / Д.М. Климов, В.И. Карев, Ю.Ф. Коваленко, К.Б. Устинов // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2013. – № 4. – С. 4–12.
10. Fracture pressure model for inclined wells in layered formations with anisotropic rock strengths / T. Ma, Q.B. Zhang, P. Chen, C. Yang, J. Zhao // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. – V. 149. – P. 393–408.
11. Нескоромных В.В., Попова М.С. Разработка алмазного инструмента с применением данных компьютерного моделирования и результатов системных исследований // Научно-технический журнал «Инженер-нефтяник». – 2018. – № 3. – С. 18–26.
12. Нескоромных В.В. Разрушение горных пород при бурении скважин. – М.: ИНФРА-М; Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2015. – 336 с.
13. Su O., Ali Akcin. Numerical simulation of rock cutting using the discrete element method // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2011. – V. 48 (3). – P. 434–442.
14. Киселев А.Т., Крусир И.Н. Вращательно-ударное бурение геологоразведочных скважин. – М.: Недра, 1984. – 102 с.
15. Александров А.Н., Кищенко М.А., Рогачев М.К. Моделирование образования твердых органических частиц в высокопара-

- финистой пластовой нефти // Научно-технический журнал «Инженер-нефтяник». – 2018. – № 2. – С. 42–49.
16. Hasan A.R., Kabir C.S. Wellbore heat-transfer modeling and applications // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2012. – V. 96–97. – P. 109–119.
17. Dong G., Chen P. 3D numerical simulation and experiment validation of dynamic damage characteristics of anisotropic shale for percussive-rotary drilling with a full-scale PDC bit // Energies. – 2018. – V. 11 (6). – P. 1326–1331.
18. Optimization model for polycrystalline diamond compact bits based on reverse design / Z. Ai, Y. Han, Y. Kuang, Y. Wang, M. Zhang // Advances in Mechanical Engineering. – 2018. – V. 10 (6). – P. 476–479.
19. Сериков Д.Ю., Гаффанов Р.Ф. Исследование напряженно-деформируемого состояния двух смежных центробежно-объемного-армированных зубьев вооружения шарошечного бурового инструмента // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2018. – № 9. – С. 42–47.
20. Detournay E., Richard T., Shepherd M. Drilling response of drag bits: theory and experiment // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2008. – V. 45 (8). – P. 1347–1360.
21. Numerical investigations on the effect of ultra-high cutting speed on the cutting heat and rock-breaking performance of a single cutter / M. Gao, K. Zhang, Q. Zhou, H. Zhou, B. Liu, G. Zheng // Journal of Petroleum Science and Engineering. – July 2020. – V. 190. – Art. no. 107120.
22. Basarir H., Karpuz C. Preliminary estimation of rock mass strength using diamond bit drilling operational parameters // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. – 2016. – V. 30 (2). – P. 145–164.
23. Королев А.Л. Компьютерное моделирование. – М.: БИНОМ. ЛТЗ, 2013. – 230 с.
24. Тревис Дж., Кринг Дж. LabVIEW для всех. 4-е изд., переработанное и дополненное. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 904 с.
25. Магда Ю.С. LabVIEW: практический курс для инженеров и разработчиков. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 208 с.
26. Васильев А.С., Лашманов О.Ю. Основы программирования в среде LabVIEW. – СПб.: Университет информационных технологий, механики и оптики, 2015. – 82 с.
27. Попова М.С. Результаты компьютерного моделирования температурного режима алмазного бурового инструмента // Научно-технический журнал «Инженер-нефтяник». – 2018. – № 2. – С. 23–26.
28. Попова М.С., Харитонов А.Ю. Компьютерное моделирование процессов, протекающих при бурении скважин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 12. – С. 18–27.
29. Borja R.I., Sama K.M., Sanz P.F. On the numerical integration of three- invariant elastoplastic constitutive models // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 2003. – V. 192 (9–10). – P. 1227–1258.
30. Che D., Zhu W.-L., Ehmann K.F. Chipping and crushing mechanisms in orthogonal rock cutting. // International Journal of Mechanical Sciences. – 2016. – № 119. – P. 224–236.

Поступила 08.09.2020 г.



**Информация об авторах**

**Нескоромных В.В.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и техники разведки Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета.

**Попова М.С.**, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры технологии и техники разведки Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета.

**Харитонов А.Ю.**, кандидат технических наук, сертифицированный LabVIEW-разработчик, инженер, ООО «Витэк-Автоматика».

UDC 622.24.051.64

## INFLUENCE OF RESISTANCE FORCES ON THE DEPTH OF ROCK CUTTING–CHIPPING BY A DIAMOND CUTTER

**Vyacheslav V. Neskoromnykh<sup>1</sup>,**  
sovair@bk.ru

**Marina S. Popova<sup>1</sup>,**  
alleniram83@mail.ru

**Anton Yu. Kharitonov<sup>2</sup>,**  
ant.kharitonov@gmail.com

<sup>1</sup> Siberian Federal University,  
95, Krasnoyarskiy rabochiy avenue, Krasnoyarsk, 660095, Russia.

<sup>2</sup> LLC «Vitek-Avtomatika»,  
170, Fontanka River Embankment, St. Petersburg, 198035, Russia.

**Relevance.** The development of drilling rock cutting tools is always aimed at improving the efficiency and resource of its work and to expand the scope. An important component of this process is the study of the mechanism of rock destruction by the working part of the tool being developed. The most difficult, but important is the study of the depth of rock cutting–chipping with a cutter. Despite the small dimensions of the system under consideration, for a more reliable result, it is necessary to take into account all the factors affecting rock destruction by a cutter. If we talk about the most significant factors that affect the efficiency of rock destruction, it is necessary to note the resistance forces that occur at the bottom of the well. The smallest cutter has a diamond rock cutting tool. The diamond type of drilling tool is quite in demand in production. In this regard, it is urgent to develop the theory and possibilities of studying the mechanism of rock destruction by a diamond cutter, taking into account the processes and phenomena occurring at the bottom, including those that impede its introduction into the rock.

**The aim** of the research is to identify the possible sources of resistance forces to the introduction of a diamond cutter into the rock, to determine the degree of influence of resistance forces and other factors on the value of the depth of rock cutting–chipping with a diamond cutter.

**Objects:** rock destruction mechanism with a single diamond cutter.

**Methods:** experiment, analytical studies, analysis, computer simulation method.

**Results.** A software product was developed that allows a detailed study of the mechanism of rock destruction by a single diamond tool. It is determined that the resistance from the side of the medium that arose at the bottom of the well affects the resulting value of the depth of cutting–chipping of the rock with a diamond cutter. The value of the resulting resistance force to the cutter depends on the type of flushing fluid and the type of rock being destroyed. It was found that as the linear velocity of the cutter increases, an increase in rock resistance and a decrease in the depth of penetration of the cutter into the rock are observed.

### Key words:

Drilling tool, destruction mechanism, diamond cutter, resistance force, modeling.

### REFERENCES

- Larin A.A. *Issledovanie protsessa vzaimodeystviya almaznogo porodorazrushayushchego instrumenta s anizotropnoy gornoy porodoy s tselyu vyyavleniya zakonomernostey estestvennogo iskrivleniya skvazhin*. Dis. Kand. nauk [Investigation of interaction of diamond rock cutting tools with anisotropic rock in order to identify patterns of natural curvature of wells. Cand. Diss.]. Tomsk, 2000. 192 p.
- Pushmin P.S. *Obosnovanie modeli almaznoy koronki na osnove issledovaniya mekhaniki razrusheniya tverdykh anizotropnykh porod*. Dis. Kand. nauk [Justification of the model of a diamond crown based on a study of the mechanics of fracture of solid anisotropic rocks. Cand. Diss.]. Irkutsk, 2006. 131 p.
- Bukanov A.A., Gorshkov L.K., Osetskiy A.I., Soloviev N.V. *Printsipy konstruirovaniya i ekspluatatsii almaznogo porodorazrushayushchego instrumenta* [Principles for the design and operation of diamond rock cutting tools]. *Exploration and protection of the subsoil*, 2013, no. 7, pp. 44–49.
- Gorshkov L.K., Osetskiy A.I. Development of principles for the design and operation of a new diamond rock cutting tool. *Journal of Mining Institute*, 2012, vol. 197, pp. 40–45. In Rus.
- Huang H., Lecampion B., Detournay E. Discrete element modeling of tool-rock interaction I: Rock cutting. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2013, vol. 37 (13), pp. 1913–1929.
- Brook B. Principles of diamond tool technology for sawing rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, vol. 39 (1), pp. 41–58.
- Tretyak A.Ya., Popov V.V., Grossu A.N., Borisov K.A. Innovative approaches to the design of highly efficient rock cutting tools. *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2017, no. 8, pp. 225–230. In Rus.
- Evseev V.D., Mavlyutov M.R. Puti povysheniya effektivnosti razrusheniya gornykh porod [Ways to increase the efficiency of rock destruction]. *Materialy regionalnoy konferentsii geologov Sibir i Dalnego Vostokai Severo-Vostoka Rossii* [Materials of the regional conference of geologists of Siberia, the Far East and North-East of Russia]. Tomsk, 2000. Vol. I, 463 p.
- Klimov D.M., Karev V.I., Kovalenko Yu.F., Ustinov K.B. Mechano-mathematical and experimental modeling of well stability in anisotropic geomeidia. *Izvestiya Rossiiskoy Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, 2013, no. 4, pp. 4–12. In Rus.
- Ma T., Zhang Q.B., Chen P., Yang C., Zhao J. Fracture pressure model for inclined wells in layered formations with anisotropic rock strengths. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, no. 149, pp. 393–408.
- Neskoromnih V.V., Popova M.S. Diamond tool development using computer modelling data and system reserch results. *Scientific and Technical Journal «Petroleum Engineer»*, 2018, no. 3, pp. 18–26. In Rus.



12. Neskoromnykh V.V. *Razrushenie gornykh porod pri burenii skvazhin* [Destruction of rocks during drilling]. Moscow, INFRA-M; Krasnoyarsk, SFU, 2015. 336 p.
13. Su O., Ali Akcin. Numerical simulation of rock cutting using the discrete element method. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011, vol. 48 (3), pp. 434–442.
14. Kiselev A.T., Krusir I.N. *Vrashchatelno-udarnoe burenie geologorazvedochnykh skvazhin* [Rotary-shock drilling of exploration wells]. Moscow, Nedra Publ., 1984. 102 p.
15. Aleksandrov A.N., Kishchenko M.A., Rogachev M.K. Modeling the formation of solid organic particles in highly paraffin reservoir oil. *Scientific and Technical Journal «Petroleum Engineer»*, 2018, no. 2, pp. 42–49. In Rus.
16. Hasan A.R., Kabir C.S. Wellbore heat-transfer modeling and applications. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2012, vol. 96–97, pp. 109–119.
17. Dong G., Chen P. 3D numerical simulation and experiment validation of dynamic damage characteristics of anisotropic shale for percussive-rotary drilling with a full-scale PDC bit. *Energies*, 2018, vol. 11 (6), pp. 1326–1331.
18. Ai Z., Han Y., Kuang Y., Wang Y., Zhang M. Optimization model for polycrystalline diamond compact bits based on reverse design. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, vol. 10 (6), pp. 476–479.
19. Serikov D.Y., Gaffanov R.F. Investigation of the stress-strain state of two adjacent centrifugal-volume-reinforced teeth of the armament of a bit drilling tool. *Scientific-technical journal «Construction of oil and gas wells on land and sea»*, 2018, no. 9, pp. 42–47. In Rus.
20. Detournay E., Richard T., Shepherd M. Drilling response of drag bits: theory and experiment. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, vol. 45 (8), pp. 1347–1360.
21. Gao M., Zhang K., Zhou Q., Zhou H., Liu B., Zheng G. Numerical investigations on the effect of ultra-high cutting speed on the cutting heat and rock-breaking performance of a single cutter. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, July 2020, vol. 190, article no. 107120.
22. Basarir H., Karpuz C. Preliminary estimation of rock mass strength using diamond bit drilling operational parameters. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2016, vol. 30 (2), pp. 145–164.
23. Koroleva A.L. *Kompyuternoe modelirovanie* [Computer modelling]. Moscow, BINOM Publ., 2013. 230 p.
24. Travis J., Kring J. *LabVIEW dlya vsekh* [LabVIEW for everyone]. Moscow, DMK Press, 2011. 904 p.
25. Magda Yu.S. *LabVIEW: prakticheskiy kurs dlya inzhenerov i razrabotchikov* [LabVIEW: a practical course for engineers and developers]. Moscow, DMK Press, 2012. 208 p.
26. Vasiliev A.S., Lashmanov O.Y. *Osnovy programmirovaniya v srede LabVIEW* [Basics of programming in the LabVIEW]. St. Petersburg, University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2015. 82 p.
27. Popova M.S. The results of computer simulation of the temperature regime of a diamond drilling tool. *Scientific and Technical Journal «Petroleum Engineer»*, 2018, no. 2, pp. 23–26. In Rus.
28. Popova M.S., Kharitonov A.Y. Computer simulation of processes at well drilling. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 12, pp. 18–27. In Rus.
29. Borja R.I., Sama K.M., Sanz P.F. On the numerical integration of three-invariant elastoplastic constitutive models. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2003, vol. 192 (9–10), pp. 1227–1258.
30. Che D., Zhu W.-L., Ehmann K.F. Chipping and crushing mechanisms in orthogonal rock cutting. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2016, no. 119, pp. 224–236.

*Received: 8 September 2020.*

#### Information about the authors

**Vyacheslav V. Neskoromnykh**, Dr. Sc., professor, head of the department of technology and equipment of investigation, Siberian Federal University.

**Marina S. Popova**, Cand. Sc., senior teacher, Siberian Federal University.

**Anton Yu. Kharitonov**, Cand. Sc., certified LabVIEW developer.