

УДК 622.24.051.64

СОПРОТИВЛЕНИЕ ПОРОДЫ ПРИ БУРЕНИИ МЕЛКОРЕЗЦОВЫМ АЛМАЗНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Нескоромных Вячеслав Васильевич¹,
sovair@bk.ru

Попова Марина Сергеевна¹,
alleniram83@mail.ru

Лиу Баочанг²,
liubc@jlu.edu.cn

¹ Сибирский федеральный университет,
Россия, 660025, г. Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 95.

² Университет Цзилинь,
Китай, 130061, г. Чанчунь, ул. Химинжу, 938.

Актуальность. На результаты бурения влияет то, насколько эффективно работает породоразрушающий инструмент на забое. Показатели механической скорости бурения, качества сооружения скважины и отбора проб тесно связаны с соответствием выбранного бурового инструмента и технологии его применения физико-механическим свойствам горных пород, слагающих вскрываемый геологический разрез. При неизменной технологии рост сопротивления со стороны забоя влечёт изменение интенсивности углубления скважины. Сведения о коэффициенте сопротивления позволяют правильно управлять процессом и своевременно регулировать характер воздействия бурового инструмента на разрушаемую зону.

Цель. Для контроля силового контакта резцов бурового инструмента с забоем скважины необходимо иметь методический аппарат, позволяющий определять механизм разрушения породы с учетом сил сопротивления. Целью работы является развитие методики изучения механизма разрушения породы алмазным резцом.

Объект: процесс разрушения горной породы мелким алмазным резцом.

Методы: метод полного факторного эксперимента, метод научного познания, аналитические исследования, анализ. В статье приведена методика исследования сопротивления горной породы разрушению алмазным резцом, основанная на применении метода полного факторного эксперимента с получением математических моделей факторов и их графической интерпретации, в частности зависимости углубления за один оборот от режимов бурения, на основании которых определяется коэффициент сопротивления в конкретный момент времени.

Результаты. Путем математической обработки ранее полученных экспериментальных данных установлена взаимосвязь коэффициента сопротивления с такими показателями, как механическая скорость бурения, величина углубления за оборот, частота вращения инструмента. Представлен аналитическое исследование возможности регулирования режимов бурения с целью достижения наибольшего эффекта разрушения горной породы путем оценки коэффициента сопротивления как функции интенсивности разрушения или углубления за один оборот. Выведена и доказана правомерность выражения зависимости коэффициента сопротивления от глубины внедрения резца в породу, числа резцов рабочего торца бурового инструмента и их размера, глубины формируемой борозды разрушения, коэффициента трения резца о горную породу и динамической составляющей работы бурового инструмента.

Ключевые слова:

Бурение, алмазный резец, полный факторный эксперимент, тангенциальное усилие, коэффициент сопротивления, сила резания, режимы бурения, углубление.

Введение

Из-за наличия неоднородности разреза и других геологических особенностей сооружения скважин в процессе бурения возникают условия неэффективного использования породоразрушающего инструмента, что приводит к преждевременному износу и снижению его ресурса, неоправданным потерям механической скорости бурения и времени [1–17]. Одним из основных факторов, влияющих на результаты бурения, является сопротивление инструменту, возникающее со стороны забоя, оценить которое можно величиной тангенциального усилия резания–скалывания горной породы и коэффициента ее сопротивления. Изменение сопротивления со стороны забоя сигнализирует о смене физико-механического состояния горного массива в зоне, на которую оказыва-

ет воздействие режущая часть инструмента. Это также может быть вызвано как переходом на новый пласт, так и изменением свойств среды, образовавшейся на забое в процессе продолжительного бурения [10–28].

В производственных условиях регулирование работы бурового инструмента возможно путем изменения режимов бурения [15–26]. Правильный и своевременный подбор частоты вращения, осевой нагрузки и подачи промывочной жидкости, учитывающий состояние забоя, способствует улучшению условий разрушения горной породы и эксплуатационных показателей породоразрушающего инструмента [23–27]. При этом следует учитывать то, что различные по твердости горные породы должны подвергаться соответствующему определенному воздействию со сторо-

ны инструмента. Таким образом, характер разрушения горной породы выступает основополагающим фактором в повышении эффективности бурения.

Именно сопротивление горной породы является препятствующим усилием внедрению резцов бурового инструмента в породу. Чем тверже порода, тем большее сопротивление она может оказать. При бурении в твердых горных породах наиболее востребованным современным инструментом являются импрегнированные коронки и долота. В настоящее время импрегнированный инструмент имеет широкий спектр использования и может применяться в породах от VI до XII категории по буримости. В то же время импрегнированный инструмент обладает самым мелким резцом по сравнению с другими видами бурового инструмента. Научное изучение механизма разрушения горной породы мелким алмазным резцом затруднительно и требует новых комплексных подходов, заключающихся в детальном аналитическом исследовании, основанном на экспериментальных дан-

ных и учитывающем все явления, возникающие в процессе бурения.

Методология исследования

Для глубокого изучения особенностей процесса разрушения горных пород мелкорезцовым алмазным инструментом за основу принят метод полного факторного эксперимента, отлично зарекомендовавший себя в научных исследованиях различных направлений. В соответствии с методикой, изложенной в работах [10, 14, 15, 28], производится обработка результатов бурения, полученных экспериментальным путем. На основании выведенных моделей механической скорости бурения, энергоёмкости разрушения горной породы и углубления за один оборот ($h_{об}$) инструмента строятся графики, отображающие зависимость основных режимов бурения: осевой нагрузки ($P_{ос}$) от частоты вращения (ω). На рис. 1 приведен пример обработки экспериментальных результатов, полученных при осевой нагрузке 400–1200 даН и частоте вращения 71–725 мин⁻¹.

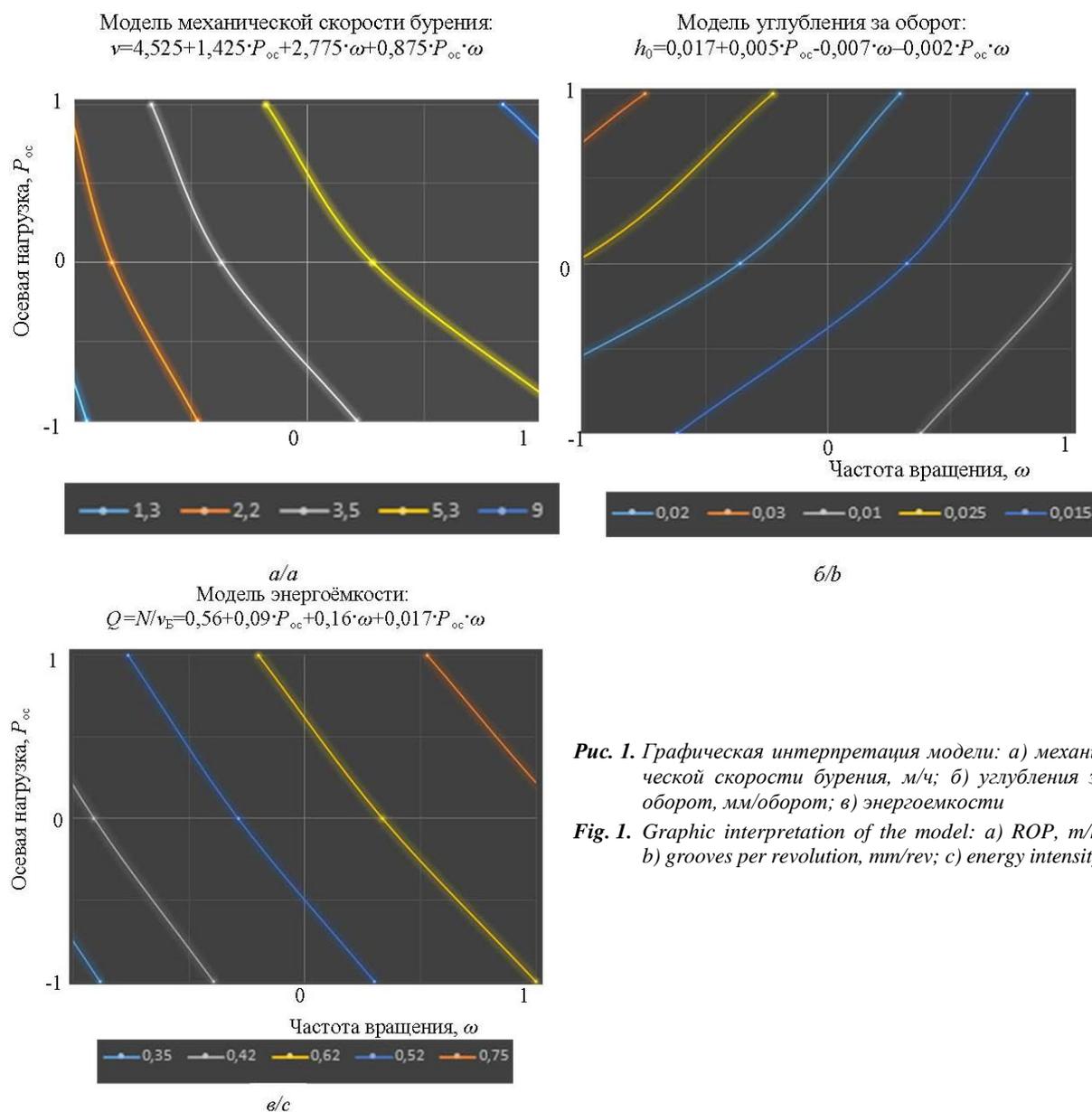


Рис. 1. Графическая интерпретация модели: а) механической скорости бурения, м/ч; б) углубления за оборот, мм/оборот; в) энергоёмкости

Fig. 1. Graphic interpretation of the model: а) ROP, m/h; б) grooves per revolution, mm/rev; в) energy intensity

Показатель эффективности работы породоразрушающего инструмента за конкретный промежуток времени полноценно отражается значением величины углубления за один оборот ($h_{об}$), которое, в свою очередь, в производственных условиях может регулироваться путем изменения осевой нагрузки и частоты вращения. Графическое преобразование полученных результатов обработки математических моделей механической скорости бурения, энергоемкости разрушения горной породы и углубления за один оборот дает возможность более точно исследовать взаимное влияние данных параметров в разных комбинациях их числовых значений.

С этой целью на основании полученного графического материала, представленного на рис. 1, осуществляется построение зависимости показателя углубления за один оборот от изменения величины осевой нагрузки при различных значениях частоты вращения бурового инструмента. Для этого на графике модели механической скорости бурения (рис. 1, *a*) отмечаются максимальное (+1), минимальное (-1) и среднее (0) значения частоты вращения, которые были приняты как предельные для проведения эксперимента. Далее, по линии заданной механической скорости бурения, определяются соответствующие выбранным значениям частоты вращения величины осевой нагрузки $P_{ос}$.

Для расчета величины углубления за оборот можно воспользоваться известной формулой (1):

$$h_{об} = \frac{v_m}{60\omega}, \quad (1)$$

где ω – выбранное максимальное, минимальное или среднее значение частоты вращения инструмента, мин^{-1} ; v_m – механическая скорость бурения, по которой выбирались режимы бурения, м/ч.

Определив таким образом три значения углубления за один оборот, при соответствующем на графике, представленном на рис. 1, *a*, значении осевой нагрузки $P_{ос}$, строится зависимость $h_{об}=f(P_{ос})$ (рис. 2, *a*; рис. 3, *a*). Такой график отражает влияние изменения осевой нагрузки на величину углубления за оборот, учитывая при этом числовые показатели частоты вращения.

В то же время из полученных графиков, представленных на рис. 2, *a* и 3, *a*, при заданных параметрах режима бурения можно получить зависимость, наглядно отражающую влияние частоты вращения на показатель углубления за один оборот. С этой целью в каждой из зон, выделенных на рис. 2, *a* и 3, *a*, проведены вертикальные линии, соответствующие значениям осевой нагрузки, обозначенные на рисунке P_1 , P_2 , P_3 . Пересечения этих вертикальных линий с графиками позволяют получить значения углублений при минимальном, среднем и максимальном значениях частоты вращения. Графически такое представление изменения данных может выглядеть так, как показано на рис. 2, *б* и 3, *б*.

Анализ

Описанная графическая интерпретация результатов ранее проведенного эксперимента позволяет

наглядно выделить и охарактеризовать взаимное влияние всех основных и важных параметров бурения, действующих на процесс разрушения горных пород на забое скважины.

На рис. 2, *a* и 3, *a* линии, отражающие изменение углубления за оборот, располагаются совершенно по-разному. Отмечается противоположность направления их наклона. Это указывает на то, что механизм разрушения горной породы в данных двух случаях протекает неодинаково: рис. 2 соответствует механизму усталостно-поверхностного разрушения, а рис. 3 – объемному механизму разрушения. Подробное объяснение данных закономерностей приведено в работах [5, 10].

Из анализа графиков на рис. 2, *б* и 3, *б* следует, что по характеру влияния частоты вращения на углубление за оборот можно судить об особенностях механизма разрушения горной породы на забое скважины при бурении.

Приведенная графика на рис. 3, *б* указывает на факт объемного разрушения. Здесь повышение частоты вращения ведет к снижению углубления за один оборот, что указывает на рост сил сопротивления забоя при повышении линейных скоростей резания–скалывания горной породы. Данное явление изучено и описано в работах [5, 10, 13, 28].

При этом угол наклона линий углубления может характеризовать уровень сил сопротивления горной породы и среды в том или ином случае, что дает возможность их сопоставить при выполнении соответствующего анализа по величине угла наклона β (рис. 2, *б* и 3, *б*). В данном случае $\text{tg } \beta$ является величиной, равной величине коэффициента сопротивления μ_k , который характеризует комплексный показатель сопротивления при разрушении горной породы тем или иным буровым инструментом.

Для анализа сил сопротивления при проведении экспериментальных работ по бурению горных пород различными типами буровых инструментов, учитывая данные, приведенные в виде графиков на рис. 1, вполне обоснованно связать значения углов β и α . Показатель угла α описан в ранее выполненных работах [5, 10]. Он составляет величину угла между вертикалью и результирующей осевого ($P_{ос}$) и тангенциального (F_T) усилий на алмазный резец, возникающих в процессе бурения (рис. 2, *в* и 3, *в*). При повышении сопротивления резанию–скалыванию происходит рост усилия F_T и угол α увеличивается. Это произойдет в случае повышения частоты вращения бурового инструмента. В то же время, согласно представленному графическому анализу, при повышении частоты вращения возрастет и угол β . А вот при повышении осевой нагрузки эти углы уменьшаются, хотя при этом увеличивается значение величины глубины внедрения алмазного резца в породу. Таким образом, углы β и α имеют одну и ту же природу, а значит, измеренный на графиках рис. 2, *б* и 3, *б* угол β может оцениваться как угол, тангенс которого эквивалентен коэффициенту сопротивления резания–скалывания–раздавливания горной породы резцом.

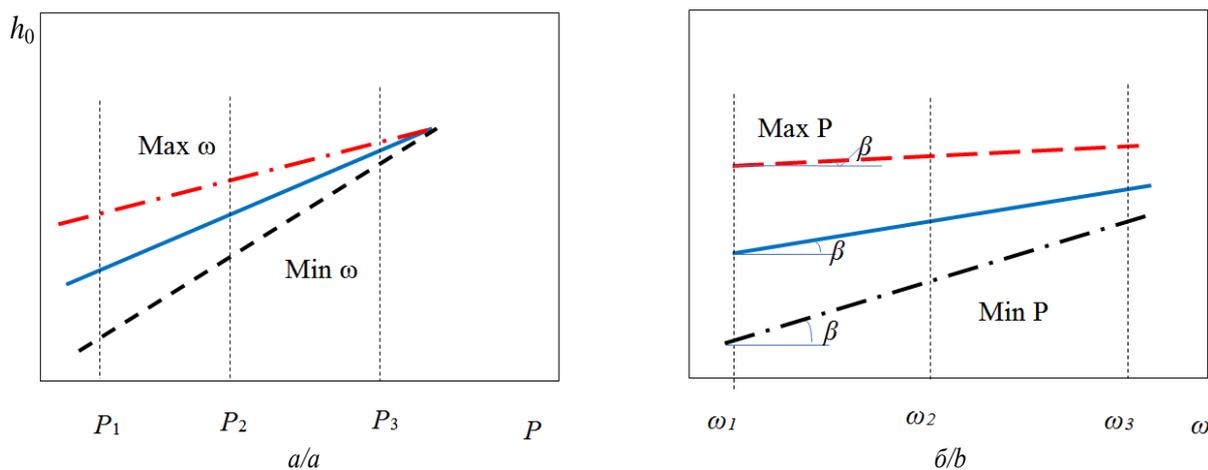


Рис. 2. Интерпретация реализации усталостно-поверхностного разрушения: а) зависимость углубления за оборот бурового инструмента от осевого усилия; б) зависимость углубления за один оборот бурового инструмента от частоты вращения; в) схема механизма разрушения

Fig. 2. Interpretation of fatigue-surface destruction realization: a) dependence of the drilling tool deepening in one revolution at the bottom hole on the axial force; b) graphical dependence of the drilling tool deepening in one revolution on the rotation frequency; c) destruction mechanism diagram

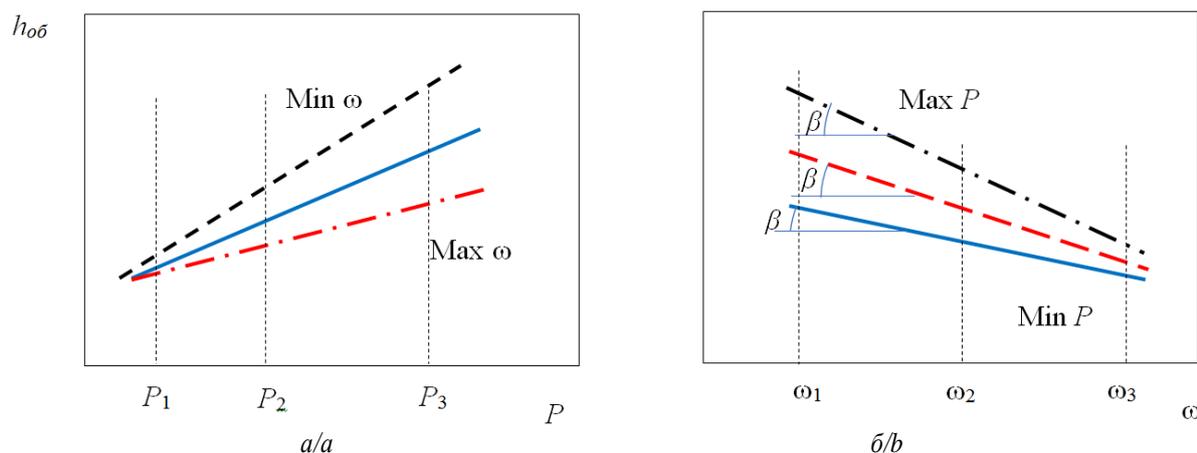
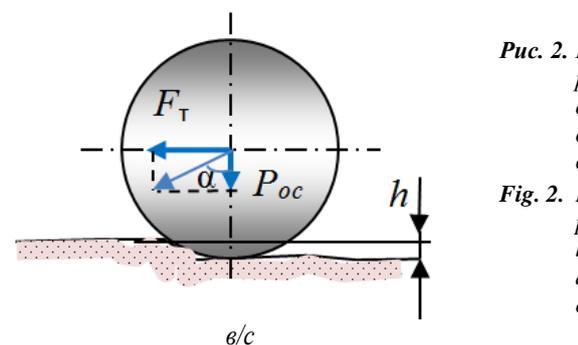
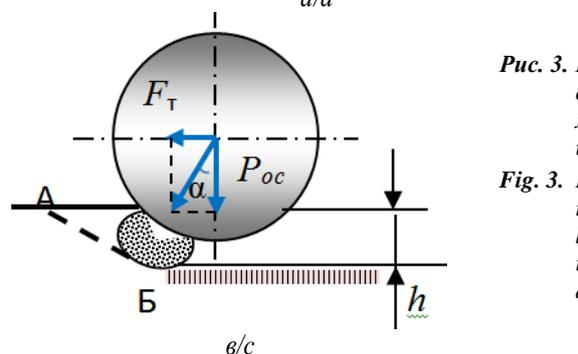


Рис. 3. Интерпретация реализации объемного разрушения: а) зависимость углубления за оборот от осевой нагрузки; б) зависимость углубления за оборот от частоты вращения бурового инструмента; в) схема механизма разрушения

Fig. 3. Interpretation of volumetric fracture realization: a) dependence of the drilling tool deepening in one revolution on the axial force; b) dependence of the drilling tool deepening in one revolution at the bottom of the rotation frequency; c) destruction mechanism diagram



Рассмотрим теоретическое обоснование выше сделанного утверждения, которое впоследствии позволит провести анализ эффективности процесса разрушения горной породы алмазным резцом бурового инструмента.

Расчет забойной мощности осуществляется путем использования известного выражения

$$N = \frac{\mu_k P_{oc} R_{и} \omega}{97,5}, \quad (2)$$

где μ_k – коэффициент сопротивления; P_{oc} – осевая нагрузка; $R_{и}$ – средний радиус торца бурового породоразрушающего инструмента, м; ω – частота вращения бурового инструмента.

Имея выражение, определяющее крутящий момент, можно найти тангенциальное усилие F_T , возникающее при разрушении горной породы буровым алмазным инструментом, как:

$$M_{кр} = F_T R_n = \frac{N}{\omega}. \quad (3)$$

Подставим в выражение (3) формулу (2), при этом учтем количество алмазных резцов на торце коронки или долота. Таким образом, получим выражение, позволяющее рассчитать тангенциальное усилие, которое примет следующей вид:

$$F_T = \frac{\mu_k P_{oc} h_n}{N_c h}, \quad (4)$$

где N_c – число алмазных резцов, армирующих торец породоразрушающего инструмента; h_n – величина глубины лунки разрушения породы.

Влияние сопротивления среды (разрушенной породы+промывочной жидкости), рассмотренное нами в работе [24], можно рассчитать по известной формуле Бернулли для скоростного напора, в результате чего получена формула (5):

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

При этом формула для расчета площади передней поверхности резца (6):

$$S = 0,125 \pi d H, \quad (6)$$

где v_p – линейная скорость перемещения резца, м/с; C_c – коэффициент формы резца (ориентировочно может изменяться от 1 (плоский резец) и до 0,5 (приостренный, ориентированный гранью вперед)); ρ_c – весовая плотность среды, Н/м³; S – площадь передней поверхности резца, м²; H – выпуск алмаза из матрицы, м.

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

$$R_c = 0,0625 v_p^2 C_c \rho_c \pi d H. \quad (7)$$

Если принять, что $v_p = 2 \pi \omega r$, то по формуле (7) можно определить сопротивление среды в зависимости от частоты вращения бурового инструмента ω и радиуса торца коронки (r – расстояния от центра торца до точки установки алмазного резца):

$$R_c = 0,25 \pi^3 \omega^2 r^2 C_c \rho_c d H. \quad (8)$$

Таким образом, с учетом параметра R_c тангенциальное усилие, представленное в формуле (4) будет выглядеть так:

$$F_T = \frac{\mu_k P_{oc} h_n}{N_c h} + 0,25 \pi^3 \omega^2 r^2 C_c \rho_c d H = \frac{\mu_k P_{oc} h_n}{N_c h} + R_c. \quad (9)$$

Если рассмотреть схему разрушения горной породы алмазным резцом (рис. 2, в и 3, в), то становится очевидно, что соотношение $\frac{F_T}{P_{oc}}$ – это ничто иное, как тангенс угла α (угла между действующим осевым усилием P_{oc} и результирующей силой R резания–скальвания–раздавливания горной породы, по направлению которой формируется ядро сжатия горной породы).

Таким образом, коэффициент сопротивления резания–скальвания–раздавливания горной породы $\mu_k = \operatorname{tg} \alpha$, а согласно рис. 2, в и 3, в угол α равен:

$$\alpha = \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{F_T}{P_{oc}}}.$$

Примем во внимание выражение (9), тогда получим, что

$$\alpha = \operatorname{arctg} \left(\frac{\mu_k P_{oc} h_n}{N_c h P_{oc}} + \frac{R_c}{P_{oc}} \right).$$

Учитывая то, что в соответствии с результатом аналитических исследований, приведенным в работе [5], угол

$$\alpha = \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{h}{d}},$$

можно получить зависимость следующего вида

$$\frac{\mu_k h_n}{N_c h} + \frac{R_c}{P_{oc}} = \sqrt{\frac{h}{d}}.$$

Из данной формулы следует:

$$\mu_k = \frac{N_c h \left(\sqrt{\frac{h}{d}} - \frac{R_c}{P_{oc}} \right)}{h_n}. \quad (10)$$

При этом известно, что значение коэффициента сопротивления перемещению резцов зависит от величины коэффициента трения резцов о породу f и коэффициента сопротивления породы разрушению μ_b , т. е. коэффициент μ_k можно записать как выражение:

$$\mu_k = \mu_b + f.$$

Формула (10) не включает коэффициента трения f , поэтому правомерно включить данный параметр в полученную зависимость. В связи с учётом вышеприведенного, коэффициент сопротивления μ_k можно рассчитать по формуле, имеющей следующий вид:

$$\mu_k = \frac{N_c h \left(\sqrt{\frac{h}{d}} - \frac{R_c}{P_{oc}} \right)}{h_n} + f. \quad (11)$$

В формуле (11) отражено влияние на коэффициент сопротивления μ_k таких параметров, как глубина внедрения резца в породу h , количество резцов на торце породоразрушающего инструмента N_c и их диаметральный размер d , формируемая глубина борозды разрушения h_n , коэффициент трения резца о горную породу f и динамическая составляющая работы бурового инструмента R_c .

Любопытно, что динамическая составляющая сопротивления R_c (формулы (7), (8)) вызывает снижение коэффициента сопротивления μ_k , что связано, очевидно, с тем, что рост линейной скорости перемещения резца v_p , вызванный повышением частоты вращения бурового инструмента ω , приводит к снижению глубины формируемой борозды разрушения. На рис. 4 представлены зависимости, полученные экспериментально, показывающие связь частоты вращения ω и глубины формируемой резцом борозды разрушения h_n [11].

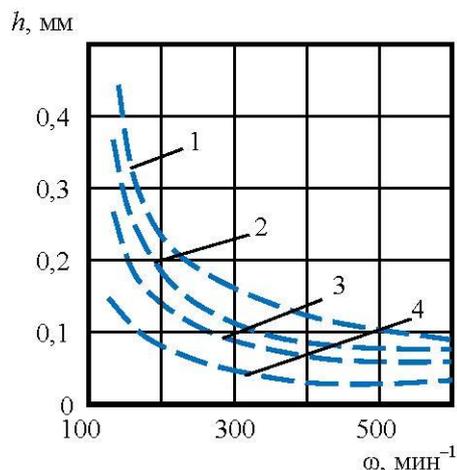


Рис. 4. Зависимость глубины борозды разрушения породы алмазным резцом (h_d) от частоты вращения (ω) при осевых нагрузках на алмазный резец, N : 1 – 140; 2 – 100; 3 – 56; 4 – 35

Fig. 4. Dependence of the furrow depth of rock destruction with a diamond cutter (h_d) on the rotation frequency (ω) under loads on the diamond, N : 1 – 140; 2 – 100; 3 – 56; 4 – 35

В этой же работе [11] на основании экспериментальных данных представлена графическая зависимость коэффициента сопротивления μ_k от частоты вращения породоразрушающего инструмента ω в процессе бурения (рис. 5).

Как следует из приведённых данных, с повышением частоты вращения ω коэффициент сопротивления μ_k снижается. Это осуществляется из-за того, что происходит снижение величины глубины борозды разрушения h_d . Анализ полученной нами формулы (10) указывает на то, что повышение глубины h_d действительно приводит к снижению μ_k . Таким образом обосновано доказательство правомерности выведенной зависимости.

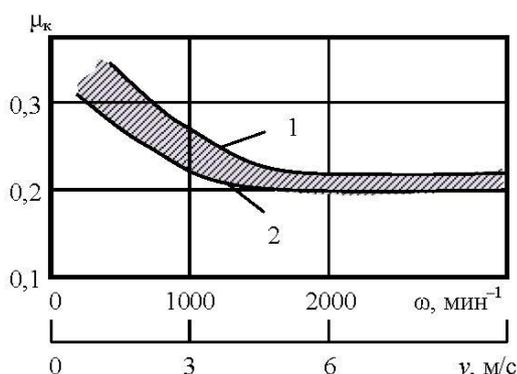


Рис. 5. Зависимость коэффициента сопротивления μ_k от линейной скорости перемещения резца (v) и частоты вращения (ω) при осевой нагрузке: 1 – 12 кН; 2 – 6 кН

Fig. 5. Dependence of the drag coefficient μ_k on the rotation frequency (ω) and the linear speed of the cutter movement (v): 1 – $P_{oc}=12$ кН; 2 – $P_{oc}=6$ кН

В формуле (10) также участвует соотношение h/h_d . Отношение значений глубины внедрения резца в по-

роду h к глубине лунки борозды разрушения h_d зависит от твердости перебуриваемой горной породы и размера алмазного резца, армирующего породоразрушающий инструмент.

Например, для более пластичных и менее твердых горных пород, а также более мелких резцов глубина внедрения резца в породу будет равна глубине борозды разрушения, т. е. $h/h_d=1$, что указывает на то, что в разрушении породы участвуют все резцы торцевой части инструмента (количество N_c).

Если глубина борозды разрушения превышает глубину внедрения резца в породу, отношение $h/h_d < 1$. Это указывает на то, что режим разрушения от резания-скалывания переходит в режим раздавливания, что характерно для применения более крупных и полированных алмазных резцов и разрушения более твердых и упругих горных пород. К примеру, если значение h/h_d будет в пределах 0,5...0,7, тогда только 50–70 % общего числа резцов будет участвовать в разрушении горной породы.

Подробно механизм разрушения горных пород резцами алмазного инструмента описан и обоснован в работах [5, 6, 10, 28].

Величина глубины внедрения резца в горную породу, согласно выводам, полученным в результате ранее выполненных исследований [5], определяется зависимостью:

$$h = r - \sqrt{r^2 - \frac{P}{\pi p_{ш}(1 + \operatorname{tg} \varphi)}}, \quad (12)$$

где P – осевая нагрузка на резец; $p_{ш}$ – твердость горной породы; r – радиус резца; φ – угол внутреннего трения в деформируемых слоях горной породы.

Как следует из анализа приведенных выражений (10)–(12), на коэффициент сопротивления μ_k определенное влияние оказывает размер алмазных резцов. Следовательно, и на энергоёмкость разрушения породы тоже.

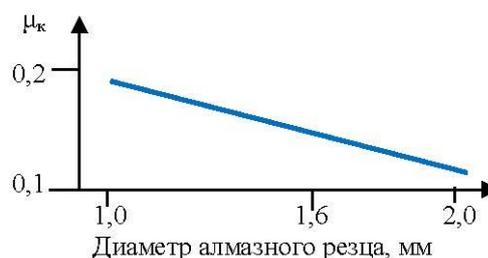


Рис. 6. Зависимость коэффициента сопротивления (μ_k) от диаметра алмазного резца

Fig. 6. Dependence of the drag coefficient (μ_k) on the diamond cutter size

В ходе экспериментальных работ было определено влияние на значение величины коэффициента сопротивления μ_k величины диаметра алмазного резца (рис. 6) [13]. Анализ графика, приведенного на рис. 6, показывает, что уменьшение алмазного резца приводит к увеличению коэффициента сопротивления. Причем с уменьшением размера резца на 1 мм коэффициент сопротивления возрастает на 0,025. Полученные законо-

мерности правомерно интерпретировать и на изменения показателей значения забойной мощности. Это объясняет результаты, полученные опытным путем, когда при бурении по одной и той же породе импрегнированным буровым инструментом затраты мощности были на 20–25 % больше, чем при бурении однослойным породоразрушающим инструментом [13].

Обсуждение

Таким образом, можно утверждать, что коэффициент сопротивления μ_k является показателем эффективности разрушения породы.

По имеющимся данным значение коэффициента сопротивления μ_k находится в пределах от 0,02 до 0,6. При этом бурение алмазным инструментом характеризуется показателями от 0,22 до 0,31 [5, 6, 10, 11, 13].

Учитывая, что коэффициент сопротивления μ_k может характеризоваться углублением за оборот, можно классифицировать состояние разрушения породы по значению величины μ_k .

1. Случай отсутствия разрушения ($\mu_k=f$).
2. Если резцы перемещаются по поверхности забоя, осуществляя лишь трение, но при этом не внедряясь в породу, углубка за оборот наблюдаться не будет, т. е. $h=0$. Исходя из выражения (11), коэффициент сопротивления будет минимален и равен коэффициенту трения резца о породу. По известным данным [11] коэффициент трения зависит от свойств горной породы, материала резца и среды их взаимодействия и, как правило, находится в пределах от 0,02 до 0,13.
3. Случай износа алмазного резца ($\mu_k=0,02-0,15$; $\mu_k=0,4-0,6$).
4. Износ алмазного резца происходит в случае, если глубина внедрения его в породу (h) составляет 0,16...0,36 диаметра алмаза. Согласно экспериментальным данным [5, 6, 10, 11, 13] при бурении заполированным алмазным режущим элементом величина μ_k составляет 0,02...0,15. Больших значений (от 0,4 до 0,6) μ_k достигает при термомеханическом разрушении рабочей части бурового инструмента.
5. Случай эффективного разрушения горных пород ($\mu_k=0,15-0,4$).
6. Учитывая, что при алмазном бурении показатель μ_k находится в диапазоне от 0,22 до 0,31, можно заключить, что эффективное разрушение горных пород алмазным инструментом соответствует ограниченному пределу значений коэффициента μ_k от 0,15 до 0,4, которого и рекомендуется придерживаться.

Помимо углубления за оборот коэффициент сопротивления характеризуется и другими параметрами бурения. К примеру, коэффициент сопротивления μ_k пропорционален механической скорости бурения. Данная зависимость описана в работе [13] и выражается в виде формулы:

$$\mu_k = 0,135 + 0,0285v_m.$$

А если проанализировать графические данные, полученные в результате проведения опытных работ

(рис. 5), увеличение частоты вращения приводит к снижению коэффициента сопротивления μ_k , рост осевой нагрузки приводит к его росту.

Таким образом, использование метода полного факторного эксперимента с получением математических моделей факторов и их графической интерпретацией позволяет точно установить характер разрушения горной породы, оценить степень сопротивления горной породы на забое и определить необходимые параметры режима бурения с целью воздействия на эффективность разрушения горной породы.

Особенности того или иного механизма разрушения горной породы характеризуются изменением углубления за оборот при регулировании частоты вращения бурового инструмента. Усталостно-поверхностное разрушение горной породы возникает в случае, когда инструмент создает на забое напряжения, но они не способствуют разрушению и накапливаются до необходимого показателя. В этом случае значение осевой нагрузки недостаточно для реализации объемного разрушения. При этом только рост частоты вращения приведет к росту углубления (рис. 2, б и 3, б).

Похожий режим будет наблюдаться и в случае зашламования забоя скважины. Даже если осевой нагрузки будет достаточно для объемного разрушения породы, но при этом подача промывочной жидкости будет недостаточной для качественной очистки забоя от шлама, характер разрушения останется усталостно-поверхностным. Отличить такой режим можно, наблюдая снижение коэффициента сопротивления при росте значения механической скорости бурения.

Рост сил сопротивления при повышении линейных скоростей резания–скальвания указывает на объемный характер разрушения породы. В этом случае к снижению углубления за оборот ведет повышение частоты вращения.

Таким образом, коэффициент сопротивления характеризует интенсивность разрушения горной породы. Характер изменения и величина этого показателя позволяют осуществлять прогноз возможностей разрушения горной породы. Например, коэффициент сопротивления, равный коэффициенту трения f , указывает на отсутствие углубления.

Графический анализ результатов метода полного факторного эксперимента позволяет производить наблюдения изменений показателя сопротивления любого характера. Так, график влияния частоты вращения на значение углубления за оборот, полученный по модели механической скорости бурения алмазной однослойной коронкой, представленной на рис. 1, а, имеет вид кривой (рис. 7), в отличие от прямолинейного графика, полученного для импрегнированной коронки (рис. 1).

Для одного и того же графика угол β на разных участках имеет различную величину и свидетельствует о падении углубления за оборот при повышении частоты вращения. В то же время при максимальных значениях частоты вращения от 400 мин⁻¹ и выше угол неизменен и равен нулю, что указывает на отсутствие углубления. Из чего следует вывод о рациональности бурения на пониженных частотах.

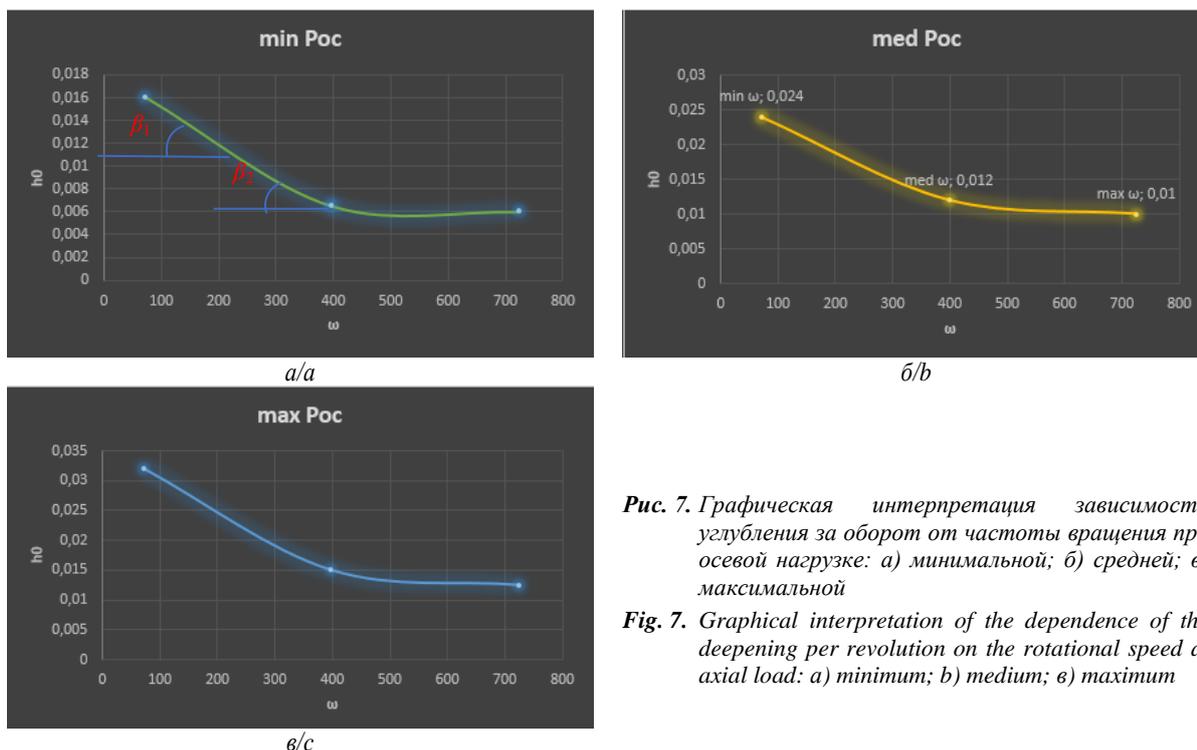


Рис. 7. Графическая интерпретация зависимости углубления за оборот от частоты вращения при осевой нагрузке: а) минимальной; б) средней; в) максимальной

Fig. 7. Graphical interpretation of the dependence of the deepening per revolution on the rotational speed at axial load: a) minimum; b) medium; c) maximum

Выводы

1. По характеру влияния частоты вращения на углубление за оборот можно судить об особенностях механизма разрушения горной породы.
2. Графический анализ результатов метода полного факторного эксперимента позволяет производить наблюдения изменений показателя сопротивления;
3. Коэффициент сопротивления можно рассчитать

$$\mu_k = \frac{N_c h \left(\sqrt{\frac{h}{d} - \frac{R_c}{P_{oc}}} \right)}{h_n} + f;$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Горшков Л.К., Осецкий А.И. Развитие принципов конструирования и эксплуатации нового алмазного породоразрушающего инструмента // Записки Горного института. – 2012. – Т. 197. – С. 40–45.
3. 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.
4. Tonon F., Amadei B. Effect of elastic anisotropy on tunnel wall displacements behind a tunnel face // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2002. – V. 35 (3). – P. 141–160.
5. Нескоромных В.В. Разрушение горных пород при бурении скважин. – М.: ИНФРА-М; Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2015. – 336 с.
6. Киселев А.Т., Крусир И.Н. Вращательно-ударное бурение геологоразведочных скважин. – М.: Недра, 1984. – 102 с.
7. 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.
8. 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.

4. Коэффициент сопротивления μ_k является показателем эффективности разрушения: при $\mu_k=f$ разрушение отсутствует; при μ_k в пределах 0,02–0,15 или 0,4–0,6 идет износ алмазного резца; $\mu_k=0,15–0,4$ – состояние эффективного разрушения горных пород;
5. Рост сил сопротивления при повышении линейных скоростей резания–скалывания указывает на объемный характер разрушения породы.
6. Снижение коэффициента сопротивления при росте значения механической скорости бурения указывает на усталостно-поверхностный характер разрушения породы.
9. Борисов К.И. Методика оценки эффективности процесса динамического разрушения горных пород инструментом режущо-скалывающего действия // Нефтяное хозяйство. – 2008. – № 8. – С. 46–47.
10. Нескоромных В.В., Попова М.С. Разработка методики управления процессом бурения на основе комплексного анализа критериев // Записки Горного Института. – 2019. – Т. 240. – С. 701–704. DOI: 10.31897/pmi.2019.6.701
11. Кардыш В.Г., Мурзаков Б.В., Окмянский А.С. Энергоёмкость бурения геологоразведочных скважин. – М.: Недра, 1984. – 201 с.
12. 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. – Iss. 6. – P. 1–12. DOI: 10.1177/1687814018781494
13. Блинов Г.А., Васильев В.И., Глазов М.Г. Алмазосберегающая технология бурения. – Л.: Недра, 1989. – 184 с.
14. Нескоромных В.В. Оптимизация в геологоразведочном производстве. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2013. – 246 с.
15. Нескоромных В.В., Пушмин П.С. Методика оптимальных параметров режима и условий бурения скважин // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАН – 2011. – № 1 (38). – С. 151–157.
16. 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.

17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. 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. 463–465.
23. Борисов К.И. Современные методы оценки сопротивления горных пород резанию-скалыванию при бурении долотами PDC: монография. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – 166 с.
24. Нескоромных В.В., Попова М.С., Харитонов А.Ю. Влияние сил сопротивления на глубину резания-скалывания горной породы алмазным резцом // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 10. – С. 40–48.
25. Closed-form solution of stress state and stability analysis of wellbore in anisotropic permeable rocks / D.-P. Do, N.-H. Tran, H.-L. Dang, D. Hoxha // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2019. – V. 113. – P. 11–23.
26. 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.
27. 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. – Article number 107120.
28. Методика управления процессом бурения и экспериментальные исследования сил сопротивления при бурении долотами с резаками PDC / В.В. Нескоромных, М.С. Попова, А.Е. Головченко, П.Г. Петенёв, Лиу Баочанг // Записки Горного Института. – 2020. – Т. 245. – С. 539–546. DOI: 10.31897/PMI.2020.5.5

Поступила 09.06.2021 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, доцент кафедры технологии и техники разведки Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета.

Баочанг Л., профессор геоинженерии кафедры разведки и бурения, Университет Цзилинь.

UDC 622.24.051.64

ROCK RESISTANCE WHEN DRILLING WITH SMALL CUTTING DIAMOND TOOLS

Vyacheslav V. Neskoromnykh¹,
sovair@bk.ru

Marina S. Popova¹,
alleniram83@mail.ru

Liu Baochang²,
liubc@jlu.edu.cn

¹ Siberian Federal University,
95, Krasnoyarskiy rabochiy avenue, Krasnoyarsk, 660095, Russia.

² Jilin University,
938, Ximinzhu street, Changchun, 130026, China.

Relevance. The drilling results are influenced by the effectiveness of the rock cutting tool operation at the bottom of the well. The indicators of the mechanical drilling speed, the quality of well construction and sampling are closely related to the correspondence of the selected rock cutting tool and technology of its application to the physical and mechanical properties of the rocks that make up the geological section being opened. With the technology unchanged, the increase in resistance from the bottom hole leads to a change in the intensity of the well deepening. Information about the resistance coefficient allows you to correctly control the process and timely adjust the nature of the impact of the drilling tool on the bottomhole.

The purpose of research is to control the power contact of the drilling tool cutters with the bottom of the well; it is necessary to have a methodological apparatus that allows determining the mechanism of rock destruction taking into account the resistance forces.

Objects: rock breaking.

Methods: experimental, full factorial experiment method, analytical research, analysis. The article presents a method for studying the resistance of rocks to destruction with a diamond cutter, based on the use of the method of a full factorial experiment with obtaining mathematical models of factors and their graphic interpretation, in particular the dependence of deepening in one revolution on drilling modes on the basis of which the resistance coefficient when drilling at a particular moment is determined.

Results. Based on the analytical study of the results obtained, the dependence of the tangential force on the axial force, rock properties, and the friction coefficient was determined. The paper presents the analytical research of the possibility of regulating drilling modes in order to achieve the greatest effect from drilling by assessing the drag coefficient as a function of the intensity of destruction or deepening in one revolution. The authors have derived and proved the validity of expression of the drag coefficient dependence on the cutter penetration depth into the rock, the number of cutters at the end of the drilling tool and their size, the depth of the formed fracture groove, the cutter friction coefficient on the rock and the dynamic component of the drilling tool operation.

Key words:

Drilling, diamond cutter, full factorial experiment, tangential force, resistance coefficient, cutting force, drilling modes, deepening.

REFERENCES

1. Bukanov A.A., Gorshkov L.K., Osetskii A.I., Soloviev N.V. Printsipy konstruirovaniya i ekspluatatsii almaznogo porodorazrushayushchego instrumenta [Principles for the design and operation of diamond rock cutting tools]. *Razvedka i ohrana nedr*, 2013, no. 7, pp. 44–49.
2. Gorshkov L.K., Osetskii 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.
3. 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.
4. Tonon F., Amadei B. Effect of elastic anisotropy on tunnel wall displacements behind a tunnel face. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2002, vol. 35, no. 3, pp. 141–160.
5. Neskoromnih V.V. *Razrushenie gornykh porod pri burnii skvazhin* [Destruction of rocks during drilling]. Moscow, INFRA-M; Krasnoyarsk, SFU, 2015. 336 p.
6. Kiselev A.T., Krusir I.N. *Vrashchatelno-udarnoe burenie geologorazvedochnykh skvazhin* [Rotary-shock drilling of exploration wells]. Moscow, Nedra Publ., 1984. 102 p.
7. 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.
8. 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.
9. Borisov K.I. Methodology for assessing the effectiveness of the process of dynamic destruction of rocks by the tool of cutting-shearing action. *Oil industry*, 2008, vol. 8, pp. 46–47. In Rus.
10. Neskoromnih V.V., Popova M.S. Development of a drilling process control technique based on a comprehensive analysis of the criteria. *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 240, pp. 701–710. DOI: 10.31897/pmi.2019.6.701. In Rus.
11. Kardysh V.G., Murzakov B.V., Okmyanskiy A.S. *Energoemkost bureniya geologorazvedochnykh skvazhin* [Energy intensity of drilling exploration wells]. Moscow, Nedra Publ., 1984. 201 p.
12. Z. Ai, Y. Han, Y. Kuang, Y. Wang, M. Zhang. Optimization model for polycrystalline diamond compact bits based on reverse design. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, vol. 10, Iss. 6, pp. 1–12. DOI: 10.1177/1687814018781494
13. Blinov G.A., Vasiliev V.I., Glazov M.G. *Almazosberegayushchaya tekhnologiya bureniya* [Diamond-saving drilling technology]. Leningrad, Nedra Publ., 1989. 184 p.
14. Neskoromnykh V.V. *Optimizatsiya v geologorazvedochnom proizvodstve* [Optimization in geological survey production]. Moscow, INFRA-M; Krasnoyarsk, Siberian Federal University Publ., 2013. 246 p.
15. Neskoromnykh V.V., Pushmin P.S. Methodology of optimal parameters of the mode and conditions of well drilling. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektii nauk o Zemle RAEN*, 2011, no. 1 (38), pp. 151–157. In Rus.

16. Tretyak A.Ya., Popov V.V., Grossu A.N., Borisov K.A. Innovative approaches to the design of highly efficient rock cutting tools. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2017, no. 8, pp. 225–230. In Rus.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. Evseev V.D., Mavlyutov M.R. Puti povysheniya effektivnosti razrusheniya gornykh porod [Ways to increase the efficiency of rock destruction]. *Materialy regionalnoy konferentsii geologov Sibiri, Dalnego Vostoka i Severo-Vostoka Rossii* [Materials of the regional conference of geologists of Siberia, the Far East and North-East of Russia]. Tomsk, 2000. Vol. I, pp. 463–465.
23. Borisov K.I. *Sovremennye metody otsenki soprotivleniya gornykh porod rezaniyu-skalyvaniyu pri burenii dolotami PDC: monografiya* [Modern methods for assessing the resistance of rocks to cutting-chipping when drilling with PDC bits: monograph]. Tomsk, TPU Publ. house, 2013. 166 p.
24. Neskoromnykh V.V., Popova M.S., Kharitonov A.Yu. Influence of resistance forces on the depth of rock cutting-chipping by a diamond cutter. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 10, pp. 40–48. In Rus.
25. Do D.-P., Tran N.-H., Dang H.-L., Hoxha D. Closed-form solution of stress state and stability analysis of wellbore in anisotropic permeable rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, vol. 113, pp. 11–23.
26. 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.
27. 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, 107120.
28. Neskoromnykh V.V., Popova M.S., Golovchenko A.E., Petenyov P.G., Liu Baochang. Drilling control technique and experimental studies of drag forces when drilling with bits with PDC cutters. *Notes of the Mining Institute*, 2020, vol. 245, pp. 539–546. In Rus. DOI: 10.31897/PMI.2020.5.5

Received: 9 June 2021.

Information about the authors

Vyacheslav V. Neskoromnykh, Dr. Sc., professor, head of the department of technology and equipment of investigation, Institute of mining, geology and geotechnologies, Siberian Federal University.

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

Liu Baochang, professor, Jilin University.