

УДК 622.243.2

СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД РЕЗАНИЕМ-СКАЛЫВАНИЕМ ДОЛОТАМИ ТИПА PDC

Борисов Константин Иванович,
kibor@tpu.ru

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность работы обоснована необходимостью изучения процесса взаимодействия режущих элементов современных долот PDC (Polycrystalline Diamond Compact) с горной породой и, как следствие, наличием различных подходов в мировых научных центрах к оценке механизма динамического внедрения PDC режцов в горные породы при бурении скважин.

Цель: детальный анализ современного состояния и перспектив развития научных исследований для всесторонней оценки динамических процессов резания горных пород долотами PDC.

Методы: теоретический анализ проблем эффективности разрушения горных пород резацами и современными долотами PDC; применение математического и физического моделирования процессов резания горных пород, флуктуационной теории прочности твердых тел для описания закономерностей поведения горных пород при работе режцов PDC; сравнительные оценки изучения процессов и механизмов статического и динамического внедрения при резании горной породы единичными элементами и долотами PDC на базе исследований, проведенных ведущими мировыми научными школами в этой области.

Результаты. Представлены результаты исследований ведущих мировых школ по различным фундаментальным аспектам взаимодействия исполнительных органов долот PDC с разрушаемыми горными породами. Выявлено, что многие результаты исследований дают полную качественную картину работы PDC вооружения буровых долот. Однако наиболее важных и точных количественных характеристик процессов резания горных пород современными долотами PDC в научной литературе немного. Рассмотрены пути развития новых методов повышения эффективности резания горных пород на базе более точных способов оценки их поведения при разрушении долотами PDC. Одна из рассмотренных перспективных методик позволяет экспериментально получить характеристику «динамической твердости горных пород» Нвд., которую возможно успешно использовать для проектирования режимов бурения и конструкции PDC долот.

Ключевые слова:

Резание горных пород, бурение нефтяных скважин, долота PDC, твердость горной породы, силы резания, моделирование процессов разрушения пород, частота вращения долота, передний угол реза, угол поворота реза.

Введение

Вопросам оценки эффективности разрушения горных пород при работе режцов PDC в различных условиях уделялось и уделяется серьезное внимание специалистами в буровой нефтегазовой отрасли [1, 2] с тех пор как в практику бурения стали активно внедряться буровые долота с композиционными пластинами типа Stratapaxtm.

За прошедшие десятилетия проведения научных исследований накоплен значительный экспериментальный и аналитический материал по оценке закономерностей взаимодействия режущих элементов PDC долот с разрушаемыми горными породами, который, в определенной части, требует обобщения и систематизации с целью дальнейшего развития научных направлений по совершенствованию конструкции PDC долот и методов проектирования режимов их эксплуатации, особенно в твердых породах [3, 4].

В работах Р. Тила [4], развитых Т. Уорреном [5], предложено использовать показатель механической удельной энергии (Mechanical specific energy – MSE) в качестве меры эффективности бурения, который может быть описан как количество энергии, необходимой для отделения от массива (срезания) единицы объема породы (1). Размерность MSE в н/м².

$MSE = (480 \times \text{Torque} \times \text{RPM}) / (d^2 \times \text{ROP}) + (4 \times \text{WOB} / \pi d^2)$, (1)
где Torque – момент вращения долота; Rotary per minute – скорость вращения долота; Rate of

Penetration – механическая скорость внедрения долота; Weight of Bit – осевая нагрузка на долото.

Авторы считали, что концепция Mechanical specific energy (MSE) обеспечивает возможность измерения эффективности бурения путем сравнительного контроля количества механической удельной энергии, вводимой в систему, и минимальной требуемой удельной энергии для бурения породы.

Лабораторные испытания, проведенные Тилом [4], показали, что энергия, затрачиваемая на разрушение единицы объема породы, относительно постоянна, независимо от изменений ROP, WOB или RPM.

Кроме этого, эксперименты Тила показали, что количественные значения MSE очень близки к прочности пород на одноосное сжатие UCS (Uniaxial compressive strength).

Таким образом, по мнению Уоррена, MSE может быть использована в качестве оценки эффективности бурового воздействия (2) путем измерения MSE в процессе бурения и сравнения его с UCS горных пород численно [5]:

$$\text{Эффективность} = \text{UCS} / \text{MSE}. \quad (2)$$

Эффективность – отношение прочности на сжатие ГП к текущей механической энергии резания MSE (%).

Ученые из университета Тулза [6] провели исследования зависимости MSE и эффективности резания для Индианского известняка и Карфагенского мрамора от глубины резания при различных скважинных давлениях.

Лабораторные эксперименты показали, что MSE, необходимая для резания известняка, уменьшается по мере увеличения глубины реза, но до определенного предела – примерно до 0,08 дюйма (около 2 мм).

В дальнейшем, при увеличении глубины реза свыше 2 мм, MSE остается постоянной при значении, близком к UCS породы (рис. 1, а, б).

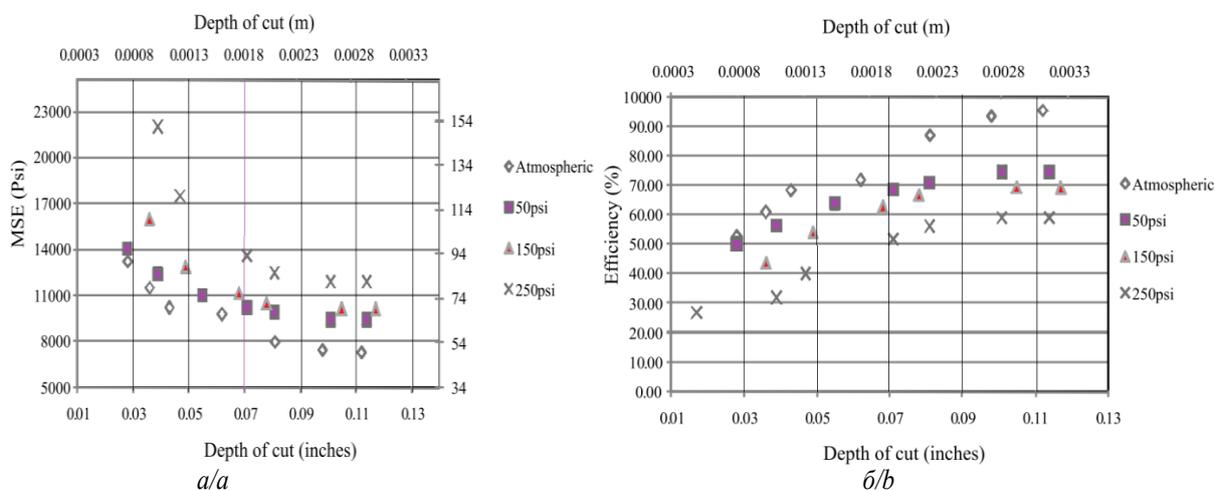


Рис. 1. Значения MSE (а) и эффективности (Efficiency) резания (б) для Индианского известняка в функции от глубины реза (Depth, дюймы, метры) для различных условий моделируемого забойного давления от 0 до 250 psi [6]

Fig. 1. MSE values (a) and efficiency of cutting (b) for Indiana Limestone as a function of depth of cut for different borehole pressure [6]

UCS Индианского известняка составляет около 7000 фунтов на квадратный дюйм. Экспериментально полученные MSE имеют постоянное значение для глубин резания больше 0,08 дюйма, что составляет около 7300 фунтов на квадратный дюйм.

Подобные результаты получены и для Карфагенского мрамора [6]: UCS Карфагенского мрамора составляет от 9000 до 1100 фунтов на квадратный дюйм. Экспериментально полученные значения MSE при глубинах реза около 0,08 дюйма и больше остаются

почти постоянными при 12000 фунтов на квадратный дюйм (рис 2, а, б).

Все испытания проводились при 60 об/мин для атмосферного давления и давлений в 50, 150 и 250 фунтов на квадратный дюйм и имели аналогичный результат [6].

Также эксперименты для Карфагенского мрамора и Индианского известняка показали, что с увеличением глубины реза эффективность резания возрастает при любых условиях скважинного давления. Это соответствует выражению (2).

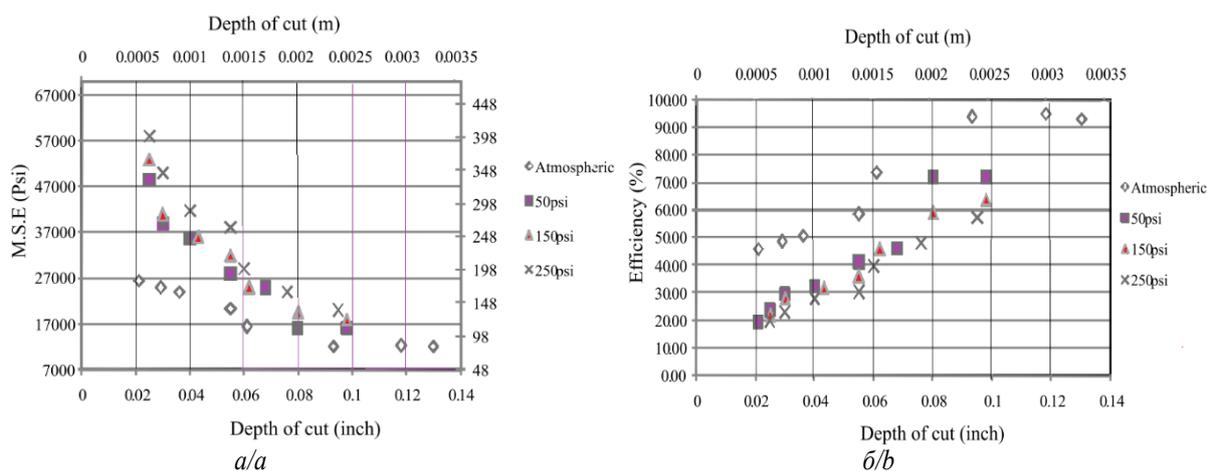


Рис. 2. Значения MSE (а) и эффективности (Efficiency) резания (б) для Карфагенского мрамора в функции от глубины реза для различных условий моделируемого забойного давления от атмосферного до избыточного соответственно в 50, 150, 250 psi [6]

Fig. 2. MSE values (a) and efficiency of cutting (b) for Karthage Marble as a function of depth of cut for different borehole pressure [6]

Представляет интерес гипотеза авторов [6], призванная объяснить уменьшение MSE, необходимой для резания породы, и рост эффективности резания с

увеличением глубины резания. Они утверждают, что при малых глубинах реза площадь контакта реза со срезаемой породой, которая имеет форму эллипса,

очень мала. Но при незначительном увеличении глубины резания происходит гораздо большее увеличение ширины реза и, следовательно, площади срезаемого слоя. Поэтому при малых глубинах резания, когда площадь резания очень мала, значение MSE велико. С ростом глубины резания отношение силы резания к площади резания уменьшается и, следовательно, значение MSE снижается, а эффективность резания растет [6].

Однако такая гипотеза не объясняет причину стабилизации показателей MSE и эффективности процесса резания при достижении определенных глубин реза – в эксперименте примерно 2 мм.

Иной методологический подход для объяснения стабилизации показателей эффективности резания использован автором [7–9] при изучении силовых характеристик динамической системы «PDC резец – порода».

В случае относительно небольших контактных давлений в системе «резец–порода», когда нет силовых условий, необходимых для отделения крупных элементов породы от разрушаемого массива, происходит только абразивное истирание поверхности горной породы. Очевидно, что сила резания F_p и осевая нагрузка G_o связаны значением коэффициента трения пары «PDC резец – порода» μ .

При более высокой осевой силе на PDC резец в породе возникают более значительные объемы нарушений, что может приводить к существенному росту силы резания и отделению от массива частиц большего размера. Таким образом, меняется качественная картина резания горных пород, так как взаимосвязь между силами резания начинает определяться не только процессами трения, но и нарастанием объема пластических нарушений в породе, которые выражаются через коэффициент сопротивления пластическому сдвигу (3) μ_{pi} :

$$\mu_{pi} = \frac{\sigma_i S_k}{G_{oi}}, \quad (3)$$

где σ_i – текущее сопротивление горной породы разрушению при снятии стружки площадью S_k .

Возникает переходная стадия разрушения в форме пластических сдвигов в горной породе, для которой используется термин «усталостное» разрушение [10, 11], а коэффициенты μ_{pi} и μ фиксируют новое взаимоотношение между действующими силами резания горных пород (4):

$$\frac{F_p}{G_o} = \mu + \mu_{pi} = K_{pi}, \quad (4)$$

где K_{pi} – комплексный коэффициент сопротивления резанию (5):

$$K_{pi} = \mu + \mu_{pi}. \quad (5)$$

При дальнейшем увеличении осевой силы происходит рост горизонтальной силы резания F_p и глубины реза от PDC резца. Однако такой неустановившийся процесс при определенном уровне сил резания приводит к достижению действующих напряжений σ_i в разрушаемой горной породе предела ее твердости $H_{вд}$. [12]. Это фиксируется стабилизацией коэффициента K_{pi} , так как количественная пропорция между

силами динамического резания – осевой нагрузкой G_o и горизонтальной силой резания F_p – становится постоянной (4). Процесс резания породы переходит в режим объемной, наиболее эффективной стадии (6) [12]:

$$F_{pc} = \frac{F_p}{G_o}. \quad (6)$$

Рассмотренные закономерности изменения режимов динамического резания для нескольких разновидностей осадочных горных пород (песчаник, алевролит, аргиллит) PDC резцом подтвердились экспериментально (рис. 3) [13].

Данные результаты привели к выводу о том, что стабилизацию коэффициента сопротивления породы резанию K_{pi} в объемном режиме можно использовать для количественной оценки характеристики динамической твердости горных пород при резании $H_{вд}$ [13].

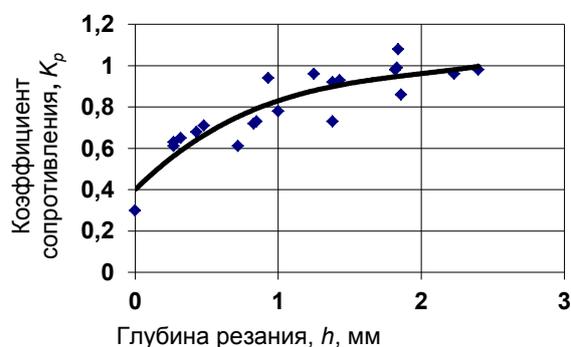


Рис. 3. Зависимость коэффициента сопротивления резанию от глубины реза в установившемся режиме резания PDC резцом [13]

Fig. 3. Dependence of the cutting resistance coefficient on the cutting depth in the steady-state cutting mode with a PDC cutter [13]

Подобную стабилизацию наблюдали в экспериментах ученых из университета Тулза [6], рассмотренную выше. Иными словами, в определенный момент рост глубины резания вследствие нарастания сил резания приводит к стабилизации количественного взаимоотношения между ними через коэффициент K_{pc} и не ведет к повышению энергетической эффективности резания. Это и было установлено авторами [6].

Исследователи Xianqun He, Chaoshui Xua [14] со ссылкой на экспериментальные исследования [15] утверждают, что при резании пород выделяются два различных режима: пластичный и хрупкий. По их мнению, при небольшой глубине резания преобладает пластичный режим; при увеличении глубины постепенно начинает преобладать режим хрупкого резания.

Глубина резания, пороговая для перехода между режимами, которую они назвали критической глубиной резания (КГР), зависит от свойств пород, геометрии установки резца и режимов резания.

Правильная оценка этой глубины, по утверждению авторов, необходима для оптимизации конструктивных характеристик породоразрушающего инструмента и режимов его эксплуатации [14].

На наш взгляд, рассуждения авторов относятся к описанному ранее многими учеными [10, 11] переходному процессу от усталостного (псевдопластичного) режима резания горных пород к объемному, наиболее эффективному режиму разрушения.

Вместе с тем группа ученых Xianqun He, Chaoshui Hua [14] на стандах исследовательского центра CSIRO, г. Перт (Австралия), выполнила значительный объем экспериментальных работ по строганию двух типов песчаников (Savonnières, Tuffeau) и изучению закономерностей силового отклика и удельной энергии резания (УЭР) при различных значениях переднего угла резца, скоростях и глубинах резания.

В определенной части результаты этих исследований подтвердили факт стабилизации коэффициента сопротивления резанию K_p [13] при определенных

уровнях сил резания горных пород, когда процесс установившегося усталостного резания переходил в эффективный объемный режим.

Результаты авторов могли бы быть значительно более информативными, если бы в экспериментах использовались расширенные диапазоны глубин резания (свыше 0,8 мм) и скоростей резания (свыше 20 мм/с).

На одном из самых современных лабораторных экспериментальных комплексов по изучению работы единичных PDC резцов университета Тулза В. Раджабов, С. Миска и др. [16] выполнили детальные исследования эффективности резания нескольких типов горных пород как в атмосферном, так и при избыточных давлениях, моделирующих забойные условия бурения.

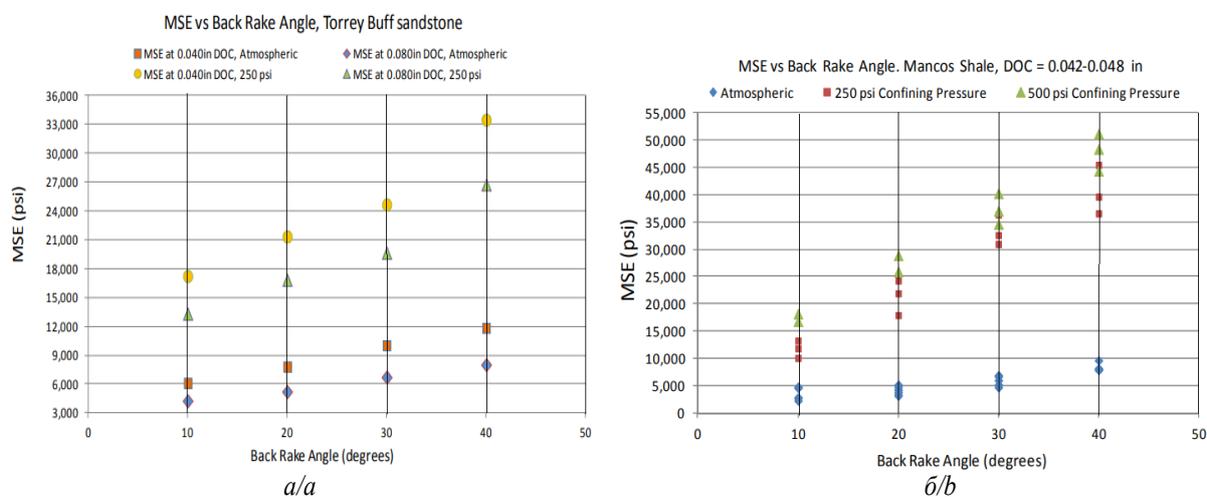


Рис. 4. Влияние переднего угла PDC резца (Back Rake Angle) на MSE (psi) при резании: а) Карфагенского мрамора; б) Mancos сланца, в атмосферных (Atmospheric) условиях и при избыточных (Confining) забойных условиях в 250 и 500 psi (по Раджабову) [16].

Fig. 4. Effect of the Back Rake Angle of the PDC cutter on MSE (psi) when cutting: a) Carthaginian marble; b) Mancos shale under, atmospheric conditions and under excessive downhole conditions of 250 and 500 psi (according to Rajabov) [16].

Результаты экспериментов показали значимое влияние переднего угла резца на величину MSE как для мрамора, так и для сланца. Причем было установлено двукратное увеличение энергии на резание мрамора, песчаника и трехкратное для сланца с изменением переднего угла с 10 до 40 градусов, как при атмосферных, так и при избыточных давлениях.

Такое различие в энергетических затратах на резание мрамора и сланца, вне зависимости от условий эксперимента, исследователи объяснили структурно-текстурными особенностями пород, связанными с их геологическим происхождением [16].

В целом же ученые пришли к выводу, что значительный рост энергетических затрат на резание различных исследованных горных пород связан с ростом всех компонентов сил резания, как горизонтальной, так и осевой, за счет увеличения контактной площадки (рис. 5).

Были также выполнены исследования влияния угла поворота резца относительно направления резания

(Side Rake Angle – SRA) в пределах от 0 до 60 градусов. На рис. 6 представлены результаты влияния угла поворота резцов на энергию резания для мрамора и сланца [16].

Как видно из графиков, имеет место малое изменение MSE при повороте резца от 0 до 30 градусов, тогда как значительное уменьшение площадки контакта с ростом SRA до 60 градусов (рис. 7) увеличивает энергетические затраты на резание пород практически в два раза.

Полезные результаты представили авторы [16] по оценке влияния углов резания (переднего и поворота) PDC резца на его «агрессивность». В механике разрушения горных пород резанием под агрессивностью понимают отношение крутящего момента на долоте (горизонтальной силы резания) к осевой нагрузке (вертикальной силе резания).

При установленных рабочих параметрах процесса резания увеличение реактивного крутящего момента на долоте считается более агрессивным.

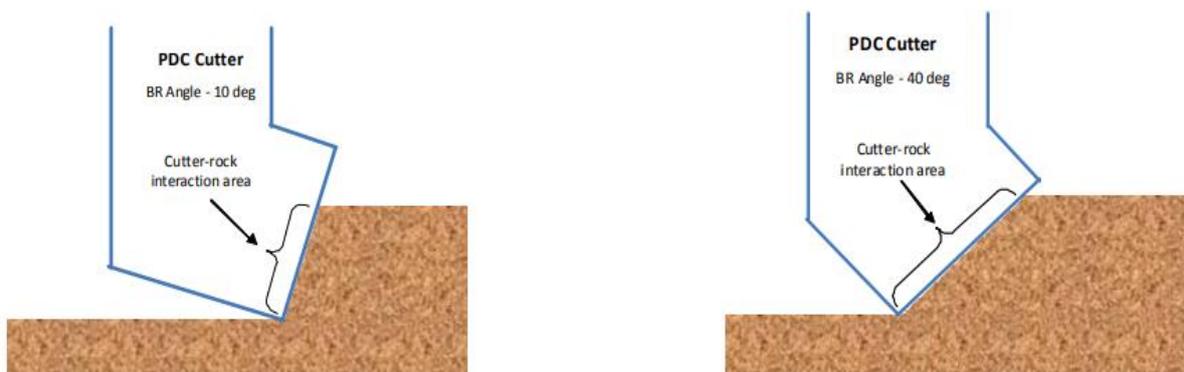


Рис. 5. Изменение размера контактной площадки PDC реза (Cutter-rock interaction area) с ростом переднего угла (Back Rake Angle) с 10 до 40 градусов по Раджабову [16]

Fig. 5. Changing the size of the PDC cutter-rock interaction area with increasing back rake angle (Rajabov) [16]

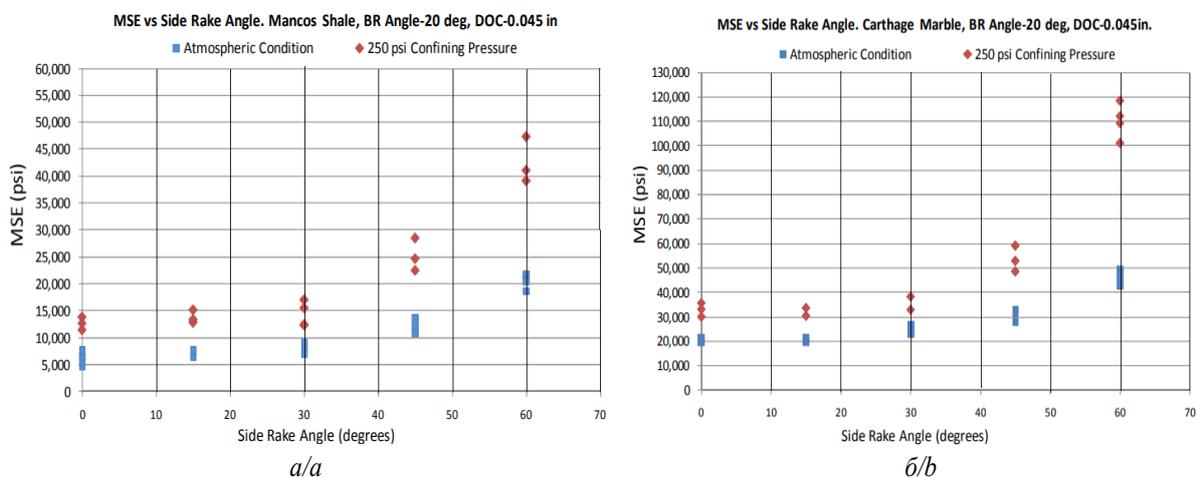


Рис. 6. Влияние угла поворота PDC резов с фаской (Side Rake Angle) на MSE при резании Mancos сланца (а), Карфагенского мрамора (б) [16] (DOC – Depth of Cut – глубина реза)

Fig. 6. Influence of the side rake angle of PDC cutters with chamfer (Side Rake Angle) on MSE when cutting Mancos shale (a), Carthaginian marble (b) [16] (DOC –Depth of Cut)

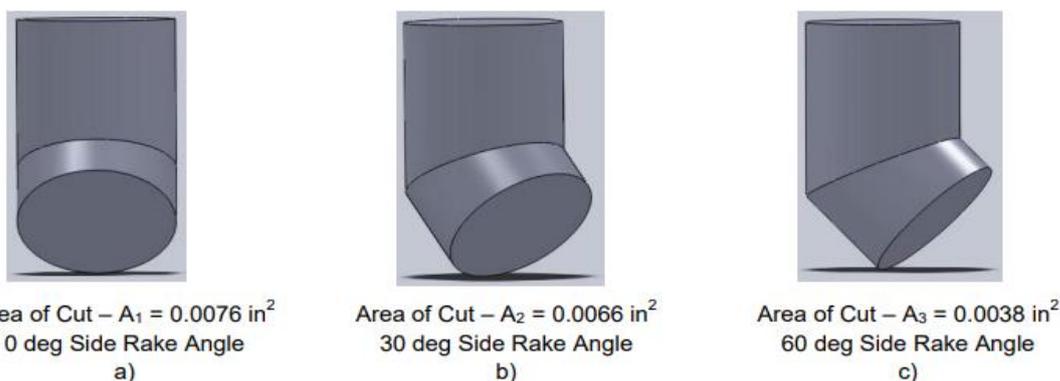


Рис. 7. Изменение площади резания (Area of cut) в зависимости от угла поворота реза (Side rake Angle); а) 0 градусов; б) 30 градусов; в) 60 градуса [16]

Fig. 7. Changing the cutting area depending on the side rake angle of the cutter [16]; a) 0 deg.; b) 30 deg.; c) 60 deg.

Из рис. 8 видно значительное увеличение сил резания и снижение агрессивности процесса с увеличением переднего угла реза для песчаника. Похожие закономерности имеют место для случая резания сланца и мрамора [16]. Однако влияние угла поворота PDC реза на агрессивность процесса резания указанных горных пород не обнаружено [16].

Представим к рассмотрению некоторые современные модели работы единичных резов PDC, которые стали очень популярными по мере того, как долота PDC получили широкое применение в бурении, и со временем начали получать все большее признание в промышленности. В некоторых исследованиях они получили название «механистических» моделей [16].

Это было в значительной степени связано с относительной простотой моделирования режущего действия

долот PDC по сравнению с моделированием вдавливания и проскальзывания зубьев шарошечных долот.

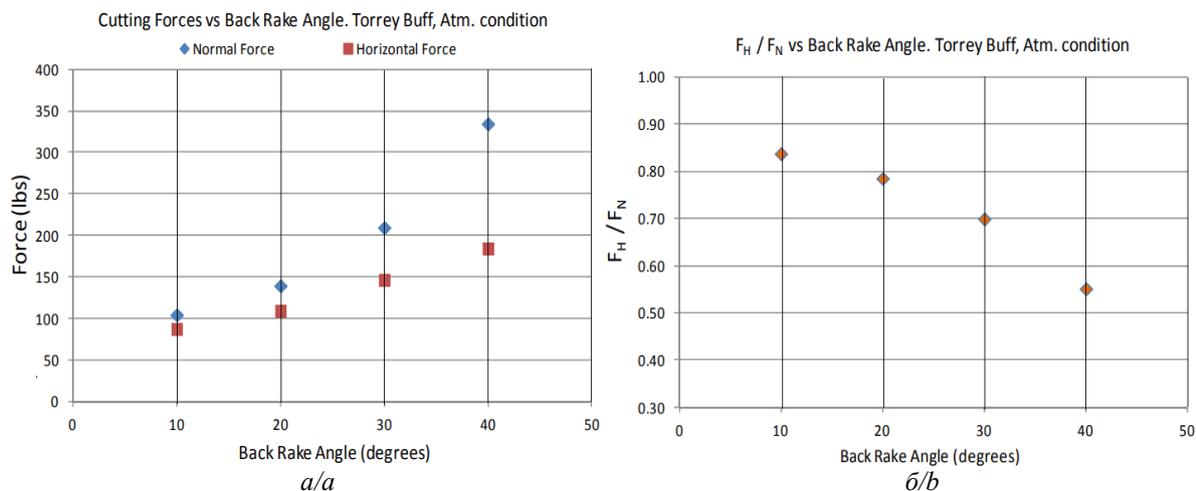


Рис. 8. Влияние переднего угла реза (Back Rake Angle) на силы резания (горизонтальная сила – F_H , вертикальная сила – F_N) и агрессивность (F_H/F_N) процесса резания песчаника Torrey Buff при атмосферных условиях по Раджабову [16]

Fig. 8. Effects of back rake angle on cutting forces (horizontal force – F_H , normal force – F_N) and aggressiveness of PDC cutter (F_H/F_N) with Torrey Buff sandstone under atmospheric condition according to Rajabov [16]

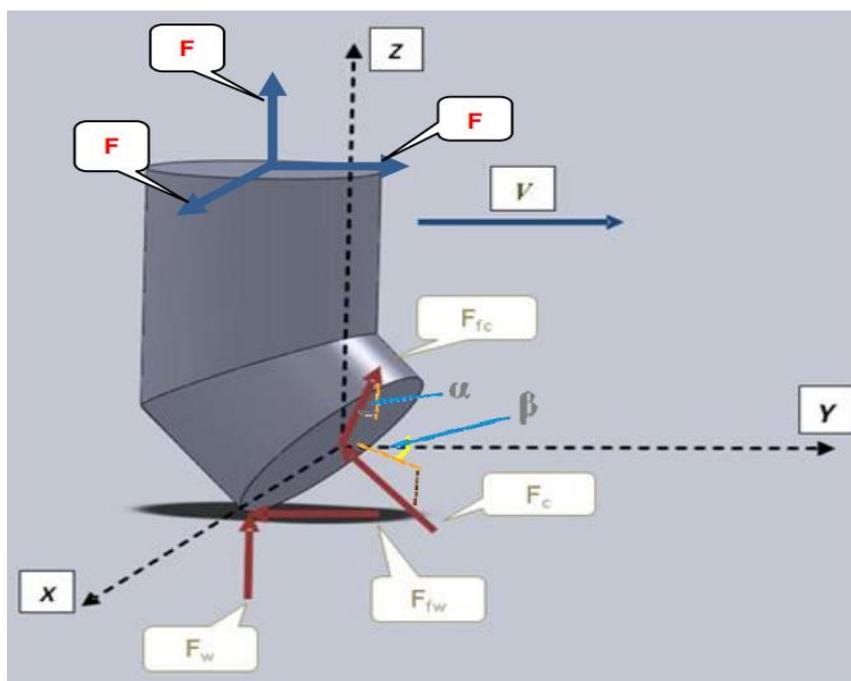


Рис. 9. Схема сил, действующих между резцом и породой в соответствии с предложенной моделью [16]. F_c – сила резания при взаимодействии резца с породой, перпендикулярная поверхности резца; F_{fc} – сила трения на границе раздела «резец–порода»; F_w – сила износа, действующая перпендикулярно площадке износа резца, плоская в нижней его части; F_{wc} – сила трения износа – действует между поверхностью износа и горной породой; F_H – горизонтальная сила резания (вдоль оси Y); F_N – осевая нормальная сила резания (вдоль оси Z); F_S – поперечная сила резания, возникающая из-за поворота резца (вдоль оси X); α , β – передний и поперечный (угол поворота) углы резца

Fig. 9. Diagram of a single PDC cutter and external forces acting on it as result of cutter–rock interaction [16]. F_c – cutting force during rock cutter interaction perpendicular to the surface of the cutter; F_{fc} – friction force at the interface «cutter–rock»; F_w – wear force acting perpendicular to the wear site of the cutter, flat in its lower part; F_{wc} – wear friction force – acts between the wear surface and the rock; F_H – horizontal cutting force (along the Y axis); F_N – axial normal cutting force (along the Z axis); F_S – transverse cutting force resulting from the rotation of the cutter (along the X axis); α , β – front and transverse (angle of rotation) angles of the cutter

В работе [16] сделана попытка разработки новой 3D механистической модели PDC взаимодействия горных пород и резца, которая включает в себя рассмотрение влияния передних углов и углов поворота резца, а также предложенного удельного коэффициента трения горных пород на силовую картину процесса резания.

Основная цель модели авторов – предсказать горизонтальную силу резания при действии заданной нормальной осевой силы, если известны передний угол наклона резца и коэффициент трения.

Модель предлагает интегрировать показатели резания горных пород всего спектра долот PDC для прогнозирования крутящего момента долота с заданным колебанием во время бурения.

Разработанная механистическая модель основана на статическом балансе сил, действующих на один резец PDC во время взаимодействия резца с породой [16].

Как показано на схеме на рис. 9, следующие внешние силы действуют на один резец во время резания породы.

Из схемы на рис. 9 возможно вычислить нормальную, горизонтальную и поперечную силы резания (7):

$$\begin{aligned} F_H &= F_C \cos \alpha \cos \beta - F_{fc} \sin \alpha \cos \beta + F_{fw}, \\ F_S &= F_C \cos \alpha \sin \beta - F_{fc} \sin \alpha \sin \beta, \\ F_N &= F_C \sin \alpha + F_{fc} \cos \alpha + F_w, \end{aligned} \quad (7)$$

где β и α – соответственно передний и поперечный (угол поворота) углы PDC резца.

После подстановки, преобразований, упрощений авторами получено выражение (8) для оценки взаимосвязи между силами (горизонтальной, осевой) резания и коэффициентом трения μ [16]:

$$F_H = F_N \cos \beta \left[\frac{1 - \mu \tan \alpha}{\mu + \tan \alpha} \right]. \quad (8)$$

Прогнозирование крутящего момента долота в соответствии с (8) может иметь, по мнению авторов, большое значение в буровых работах, поскольку некоторые важнейшие скважинные буровые инструменты, такие как буровой двигатель, бурильная колонна и компоненты забойной компоновки (bottom hole assembly – ВНА), имеют ограниченный максимальный крутящий момент.

В аналитическом исследовании Е. Вторушина, В. Доровского была применена неевклидова динамическая модель неупругих деформаций для решения динамической задачи разрушения горных пород резанием [17] (рис. 10).

В работе указано, что любое математическое описание динамического процесса резания-скалывания должно учитывать реактивную осевую силу R , действующую на режущий инструмент, описанную аналитически (1982) [7] и экспериментально подтвержденную Борисовым [18]. Авторы [17] отмечают, что сопротивление проникновению резца в породу по Борисову возрастает с линейной скоростью резца.

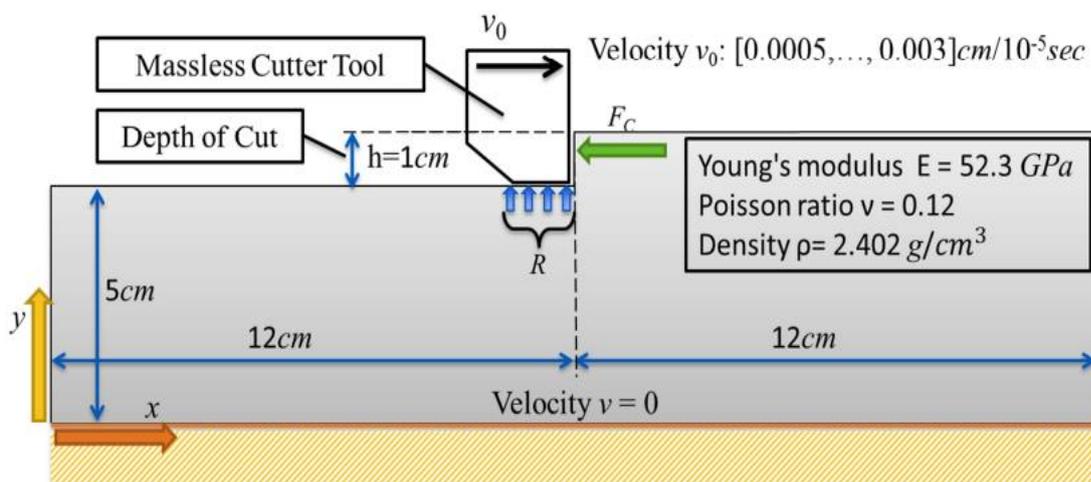


Рис. 10. Схема использования динамической модели деформаций для оценки сил резания горных пород единственным резцом [17]. R – реакция горной породы по Борисову [17]; h – глубина срезаемого слоя породы; F_c – горизонтальная сила сопротивления резанию породы; Massless Cutter Tool – модель резца; Depth of cut – глубина резания породы; Velocity v_0 – скорость перемещения резца

Fig. 10. Stair step sample of rock with moving riser face [17]. R – rock reaction according to Borisov [17]; h – cut rock layer depth; F_c – horizontal force of resistance to rock cutting; Massless Cutter Tool – cutter model; Depth of cut – rock cutting depth; Velocity v_0 – cutter movement speed

Исследованиями [17] подтверждена значимая зависимость осевой реакции и сил резания от скорости резца. Однако аналитическое исследование зависимости сил резания от глубины резания неожиданно показало, что осевая сила реакции оказалась нейтральной к изменению глубины резания, в то время как горизонтальное усилие резания, приложенное к перед-

ней грани резца, линейно зависит от глубины резания [17]. Видимо, на результат исследований по осевой силе оказало влияние использование аналитической методики моделирования деформаций.

Вместе с тем в работах [18, 19] приведены экспериментальные данные существенного возрастания осевой силы резания породы R_b при неизменной глу-

бине реза $h=\text{const}$ с увеличением скорости резания. Пример зависимости осевой силы резания от скорости движения PDC реза для песчаника представлен на рис. 11.

Данные материалы и результаты исследований других авторов [20–22] свидетельствует о зависимости твердости горных пород от времени действия механической нагрузки.

Известен целый ряд научных коллективов, которые представляли пути объяснения данного явления. В частности, интересны теоретические результаты исследователей, полученные еще в 1970-х гг. под руководством академика С.Н. Журкова. Признаваемая многими учеными фундаментальная зависимость для оценки временного поведения твердых тел под нагрузкой в соответствии с термофлуктуационной теорией имеет вид [21]:

$$\tau = \tau_0 \cdot e^{\frac{u(\sigma)}{kT}}, \quad (9)$$

где $\tau_0=10^{-13}$ с – период собственных тепловых колебаний (флуктуаций) атомов; $u(\sigma)$ – потенциальный барьер разрушения, равный $u(\sigma)=u_0-\gamma\sigma$; u_0 – энергия кристаллической решетки материала; γ – структурно-чувствительный коэффициент с размерностью объема; σ – действующее механическое напряжение; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура.

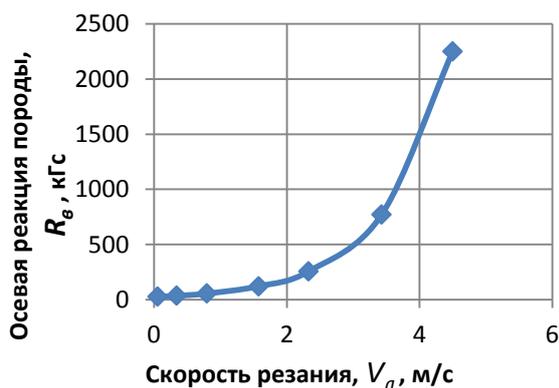


Рис. 11. Зависимость осевой реакции горной породы $R_{в}$ от скорости резания $v_{л}$ при постоянной величине срезаемого резцом слоя $h=\text{const}$ [18]

Fig. 11. Dependence of the axial reaction of the rock $R_{в}$ on the cutting speed $v_{л}$ at a constant value of the layer cut by the cutter $h=\text{const}$ [18]

Ленинградскими исследователями установлено, что на атомах любого твердого тела с интервалом в $\tau_0=10^{-13}$ с, который они назвали периодом собственных колебаний атомов, возникают тепловые флуктуации, которые потенциально могут снизить стабильность связей внутри твердого тела. Однако, так как процесс носит хаотичный характер, снижения стабильности и прочности твердого тела не происходит. По мнению исследователей, только внешнее механическое воздействие на твердое тело σ приводит к тому, что тепловые флуктуации начинают направленно снижать стабильность связей, а, следовательно, и уменьшать прочностные характеристики материала, преодолевая потенциальный барьер $u(\sigma)$. Время, не-

обходимое для разрушения твердого тела τ , в соответствии с (9), снижается. Чем больше величина внешней нагрузки σ , тем больше становится интенсивность направленного действия тепловых флуктуаций, снижающих стабильность связей внутри твердого тела и приводящих к снижению времени до разрушения твердого тела. Иными словами, чем больше величина внешней механической нагрузки, тем меньше время до разрушения твердого тела (9) [21]. И наоборот, чем меньше величина возмущающей силы, тем больше необходимо времени до разрушения твердого тела.

Такого объяснения зависимости прочности твердого тела от времени придерживаются все больше ученых, работающих над изучением свойств горных пород. В частности, в подтверждение работоспособности термофлуктуационной концепции в работе [22] проведены расчеты зависимости времени до разрушения кристаллического твердого тела (каменной соли) под нагрузкой от величины барьера разрушения $u(\sigma)$, снижаемого действием внешнего механического напряжения σ . Расчеты показали (рис. 12), что зависимость носит экспоненциальный характер в соответствии с выражением (9).

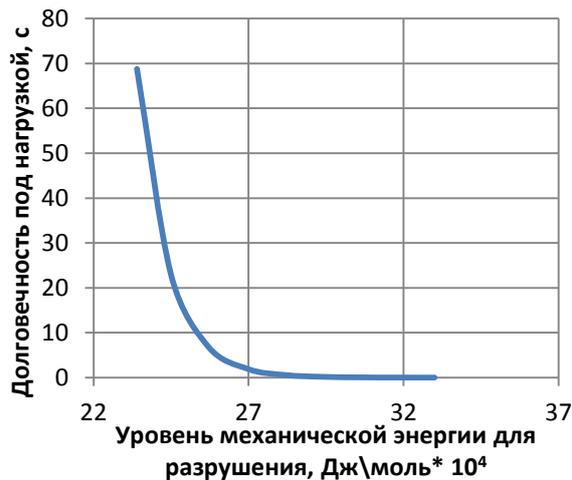


Рис. 12. Зависимость долговечности твердого тела τ от величины внешней энергии σ , снижающей потенциальный барьер разрушения [22]

Fig. 12. Dependence of the durability of a solid body τ on the value of mechanical energy σ , which reduces the potential barrier of destruction [22]

Проведенные исследования [18] также в определенной степени указывают на то, что фактическая величина твердости горных пород зависит от времени действия разрушающего напряжения или скорости перемещения режущего элемента PDC вдоль плоскости резания (рис. 23).

Указанные результаты наводят на мысль, что количественная характеристика, в частности динамическая твердость горной породы, может представлять собой не фиксированную предельную величину, а предельную временную функцию твердости $\sigma_i=\sigma(\tau)$, или $H_{в}=H_{в}(\tau)$.

Если следовать такому формату рассмотрения свойства твердости пород при работе резцов PDC, то для количественной оценки их поведения под нагрузкой необходимо построение графической зависимости сопротивления внедрению от скорости установившегося процесса резания. Тогда такие графические зависимости возможно успешно использовать в практических приложениях как для расчетов режима бурения долотами PDC, так и в целях проектирования конструкции породоразрушающих инструментов.

Необходимо отметить важный момент сложного научного развития о том, что вышеприведенные положения прямо противоречат широко признаваемой и используемой макроскопической теории разрушения горных пород. В соответствии с последней представление о твердости пород основано на том, что разрушение наступает после завершения процесса деформирования при достижении силовой нагрузки предельной прочностной величины $\sigma = \text{const}$, не зависящей от времени ее действия [10, 11]. Однако все больше практических результатов в области резания горных пород PDC резаками свидетельствуют о необходимости учета времени до разрушения, от которого зависит уровень действующих сил резания [17–22].

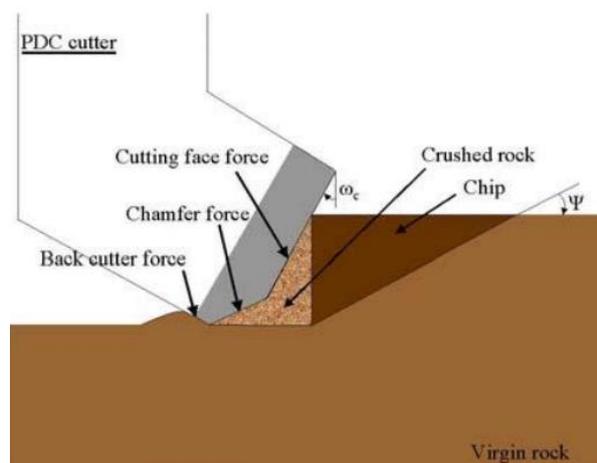


Рис. 13. Модель взаимодействия PDC резака, имеющего фаску, с разрушаемой породой [23]. ψ – угол естественного скалывания породы; ω_c – передний угол резака; Cutting face force – сила резания по передней грани резака; Chamber force – сила резания на фаске резака; Back cutter force – сила резания по задней грани резака; Crushed rock – ядро разрушенной породы; Chip – элемент скола горной породы; PDC cutter – резец; Virgin rock – образец горной породы

Fig. 13. Idealization of forces acting upon PDC cutter [23]. ψ – angle of rock natural cleavage; ω_c – cutter front angle; Cutting face force – cutting force on the front face of the cutter; Chamber force – cutting force on the cutter chamfer; Back cutter force – cutting force on the back face of the cutter; Crushed rock – core of the destroyed rock; Chip – element of rock chipping; PDC cutter – bit cutter; Virgin rock – rock sample

Ученые Парижской горной школы [23] одними из первых исследователей представили новую модель

взаимодействия в системе «PDC резец – горная порода», которая вводит в рассмотрение формируемое ядро измельченных материалов по режущей кромке (рис. 13).

Как видно из рис. 13, модель предусматривает, что усилие, приложенное к режущей грани, передается к горной породе через ядро измельченного материала. Следствием этого процесса, как установили авторы [23], является постоянный размер отделяемой от массива консоли горной породы, не зависящей от ориентации передней грани PDC резака и характеризуемой только углом естественного скола горной породы ψ .

Таким образом, передний и боковой углы (угол поворота) резака влияют на силу по режущей поверхности только посредством трения на контакте между ядром измельченного материала и поверхностью горной породы. При этом, в соответствии с рис. 5, осевая сила резания существенно зависит от площади контакта передней грани резака с ядром разрушения.

Необходимо отметить, что экспериментально наличие уплотненного ядра разрушенной породы перед передней гранью резака наблюдали и ранее исследователи по резанию горных пород. Однако детальное рассмотрение силовой картины в модели измельченных материалов перед передней гранью острого PDC резака, равно как и резака с фаской, наиболее полно представлено в работах Парижской горной школы (L. Gerbaud, S. Menand, H. Sellami) [23]. Оно обеспечивает, по мнению авторов, лучшее качество оценки сил резания, а также учитывает влияние переднего и бокового (поворота) углов (рис. 14).

Также авторы [23] представили модель деформации горных пород на задней грани резака (рис. 15). Лабораторные наблюдения показали, что часть измельченного материала ядра размещается под задней гранью резака.

Как показано на рис. 15, напряжения на задней грани резака изменяется линейно от гидростатического σ_0 давления в измельченном ядре горной породы на острие резака до нуля в конечной точке сжатия с углом α , который определяется как угол естественного скалывания и считается свойством горной породы.

Автор исследований [24] также считает необходимым изучение поведения «ядра сжатия» разрушенной горной породы перед PDC резаком при его перемещении вдоль плоскости резания. Ядро сжатия породы влияет на величину и ориентацию сил резания на передней грани резака, которые зависят также и от коэффициента внутреннего трения.

По мнению автора (рис. 16), усилие R через деформированное ядро мелко разрушенной горной породы формирует напряжения, достаточные для скалывания сегмента породы впереди резака под углом естественного скалывания. Вместе с тем авторы [24], в отличие от исследователей [23], считают, что линия скалывания породы от действия ядра сжатия способна перемещаться вдоль режущей кромки резака. На этот процесс влияют размеры и геометрия ядра уплотненной породы, а также величина переднего угла наклона PDC резака.

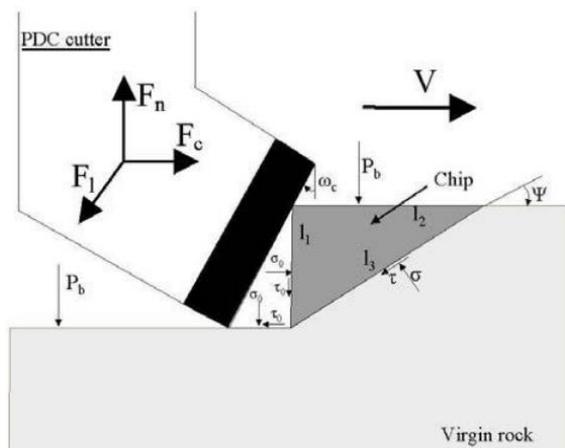


Рис. 14. Силовая картина взаимодействия реза с моделью измельченного ядра горной породы по L. Gebraud [23]. F_b , F_n , F_c – поперечная, нормальная и горизонтальная силы резания; P_b – забойное гидростатическое давление; τ_σ , σ_σ – касательные и нормальные напряжения в разрушенном ядре спрессованной горной породы; ω_c – передний угол реза; ψ – угол естественного скалывания горной породы; V – скорость перемещения PDC реза вдоль плоскости резания; τ , σ – касательные и нормальные напряжения по границе скола элемента горной породы (chip) с размерами l_i ; Virgin rock – образец горной породы; PDC cutter – резец

Fig. 14. Build up edge of crushed material model [23]. F_b , F_n , F_c – transverse, normal and horizontal cutting forces; P_b – downhole hydrostatic pressure; τ_σ , σ_σ – tangential and normal stresses in the collapsed core of compressed rock; ω_c – cutter front angle; ψ – rock natural cleavage angle; V – speed of movement of the PDC cutter along the cutting plane; τ , σ – tangential and normal stresses along the boundary of the cleavage of a rock element (chip) with dimensions l_i ; Virgin rock – rock sample; PDC cutter – bit cutter

Размеры и форма ядра сжатия при резании породы существенно зависят от их упруго-пластичных и прочностных свойств. В мягких породах перед передней гранью реза формируется слабое уплотнение, так как сегмент породы практически сразу выдавливается на свободную поверхность даже при невысоких силах резания. В породах средней прочности образуется ядро небольшого размера, обычно в виде полусферы или сегмента эллипсоида.

При этом автор [24] подчеркивает, что, когда равнодействующая сила резания R направлена под прямым углом к передней грани реза, формируется симметричное ядро уплотнения (рис. 16, а). Если равнодействующая сила R ориентирована вглубь породы (рис. 16, б), ядро сжатия теряет симметрию, проникает на большую глубину, что приводит к увеличению размера скалываемого сегмента породы. Однако, если сила R направлена к свободной поверхности резания, ядро сжатия теряет симметрию в этом же направлении забоя скважины. Это сопровождается снижением глубины реза и размера скалываемого сегмента горной породы (рис. 16, в).

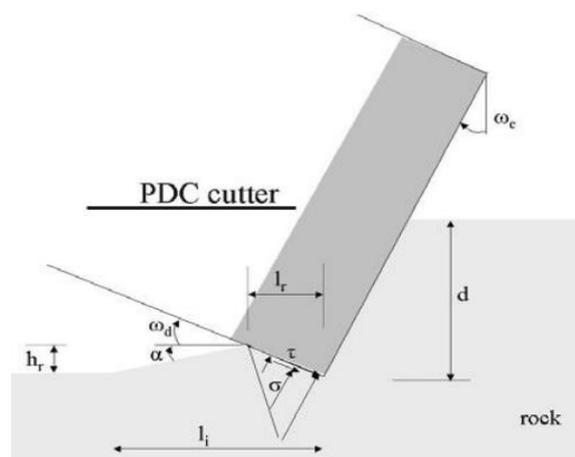


Рис. 15. Силовая картина взаимодействия острого реза с породой при перемещении части измельченного ядра на заднюю грань [23]. d – глубина резания; ω_d – задний угол реза; ω_c – передний угол реза; τ , σ – касательные и нормальные напряжения горной породы по задней грани реза; l_r – ширина реза в проекции на плоскость резания; h_r – глубина слоя породы, перемещенной на заднюю грань реза; α – угол «регрессии» породы; rock – образец горной породы; PDC cutter – резец

Fig. 15. Stress distribution upon the back cutter face [23]. d – cutting depth; w_d – cutter rear angle; w_c – cutter front angle; τ , σ – tangential and normal stresses of the rock along the rear face of the cutter; l_r – cutter width projected onto the cutting plane; h_r – depth of the rock layer moved to the rear face of the cutter; α – rock «regression» angle; rock – rock sample; PDC cutter – bit cutter

Второй и третий случай представляют неустановившийся динамический режим резания горной породы, возникающий либо из-за изменения свойств буримой породы, либо по причине снижения или повышения осевой нагрузки на PDC резец. В конечном счете в результате любых изменений глубины реза в породе всегда наступает установившийся режим резания. В этом случае равнодействующая сила резания ориентирована перпендикулярно передней грани реза.

Интересно развитие знаний в различных научных школах, в разное время работы коллективов ученых, относительно влияния геометрии установки PDC резов в корпусе долота на эффективность разрушения горных пород в процессе их резания.

Л. Гиббс установил, что при резании Jack Fork песчаника резами диаметром 32 дюйма силы резания минимальны при передних углах от 10 до 20 градусов, независимо от скорости резания [25].

Е. Гувер после проведения полноформатных испытаний буровых долот при атмосферных условиях установил, что оптимальным передним углом резов при бурении песчаника является 20 градусов, а при бурении твердых гранитов – 25 градусов, потому что при таких параметрах снижается износ и другие характеристики работы вооружения долот [26].

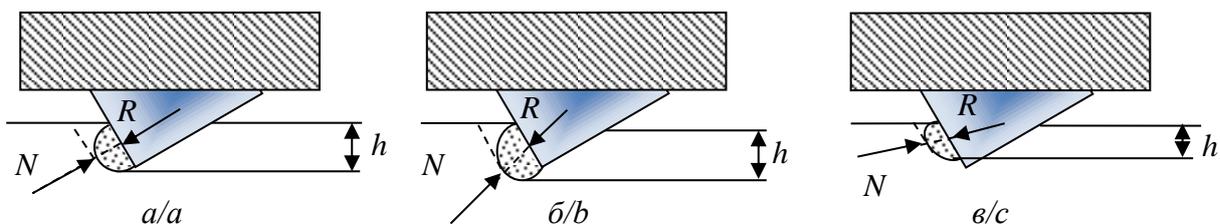


Рис. 16. Схемы трансформации ядра сжатия породы при установившемся режиме резания-скалывания (а), заглублении реза (б) и повышении сопротивления резанию-скалыванию (в) [24]

Fig. 16. Schemes of transformation of the crushed rock under the steady cutting mode (a), deepening of the cutter (b) and increasing the resistance to cutting (c) [24]

С. Хью, продолжая полноформатные испытания четырех PDC долот с установкой в них резцов, имеющих передние углы в 7, 15, 20, 25 градусов, пришел к заключению, что угол в 20 градусов является оптимальным с точки зрения максимальных значений скорости бурения в резании сланцев [27]. С. Хью, однако, пришел к неожиданным выводам о том, что глубина реза при работе долота не влияет на количественные показатели его бурения.

Х. Карасава в результате исследований пришел к выводу, что уменьшение переднего угла PDC резца приводит к снижению скорости внедрения и оценил угол в 10 градусов как оптимальный при бурении твердых горных пород. Передний угол в 20 градусов резко снижает показатели бурения [28]. К таким же выводам независимо пришел К. Ли [29].

Л. Синор по результатам исследований установил, что при переднем угле резцов долота в 10 градусов скорость бурения Карфагенского известняка в 4 раза выше, чем при угле в 40 градусов [29].

С. Кудизер с коллегами представили на конференции в Хьюстоне результаты исследований о влиянии переднего и бокового углов единичных резцов на MSE при резании песчаников (Vosges) и известняков (Lens) [30]. Ученые показали, что при резании указанных горных пород MSE пятикратно возрастает при изменении переднего угла PDC резца с 10 до 60 градусов. С другой стороны, их результаты свидетельствовали об отсутствии влияния бокового угла резца на MSE вплоть до 45 градусов.

Как видно из краткого обзора, среди исследователей нет единого мнения о наличии оптимального переднего угла резания и обоснования его эффективно значения.

Между тем Т. Уорреном было сделано предположение, на базе цикла исследований, о важном влиянии на эффективность процесса резания горных пород PDC резцами эффекта «bit whirl» – поперечных забойных вибраций долота, которые повышают износ инструмента и снижают буримость горных пород. Этот эффект, по мнению автора, и снижает влияние малых передних углов на скорость бурения [31].

Важные результаты для понимания влияния вибраций на эффективность проходки скважины и особенности работы PDC резцов представили авторы [32, 33].

Некоторые современные пути снижения вибраций в конструкциях PDC долот рассмотрены и реализова-

ны исследовательской группой в лабораториях российского предприятия Буринтех [34].

Для борьбы с вибрациями компания Ultergo предложила конструкцию долота с торговой маркой «Counter Force» [35]. J. Silveus, A. Skinner предложили PDC резцы на торце долота устанавливать так, чтобы два соседних резца передней рабочей гранью были повернуты навстречу друг другу [35]. Это позволяет, по мнению авторов, снизить поперечные вибрации долота и негативное влияние эффекта «bit whirl».

Вызывают интерес неоднозначные по результату исследования уфимских ученых, касающиеся лабораторного моделирования работы одновременно нескольких PDC резцов, позволяющих, по мнению авторов [36], получить важные данные для проектирования режимов бурения PDC долотами. В процессе интерпретации результатов лабораторных экспериментов они предложили оценку загрузки резцов PDC при разрушении «пластично-хрупких горных пород различной твердости» проводить с использованием так называемых «относительных величин давлений вдавливания и резания», которые предлагается рассчитывать относительно пределов текучести и твердости горной породы по штампу (по методу Л.А. Шрейнера) [36].

Термин «пластично-хрупкие» горные породы, равно как и широко используемый термин «упруго-пластичные», недостаточно полно и точно характеризует сложные процессы деформации и разрушения пород при их резании PDC резцами.

Если в процессе движения резца вдоль плоскости резания порода вначале проявляет упругие деформации, то в ее характеристике, видимо, необходимо это указывать.

Далее, если при перемещении резца горная порода (таких типов пород немного) проявляет хрупкое разрушение с отделением от массива крупных обломков в пределах угла естественного скалывания, справедлив термин «упруго-хрупкая» горная порода.

Оценим поведение другой горной породы при деформировании и разрушении PDC резцом. При движении резца в установившемся режиме резания горная порода деформируется в пределах закона Гука. Затем вследствие наличия у породы объективной возможности перемещения внутренних слоев друг относительно друга (течения) без разрушения проявляется свойство пластичности.

При дальнейшем движении реза и определенном уровне напряжений в горной породе перед передней гранью реза ее частицы теряют связность и превращаются в мелко дисперсный порошок (псевдожидкость). Этот процесс под действием «ядра псевдожидкости» завершается хрупким отделением (выколом) консоли горной породы перед движущимся резцом в пределах угла естественного скалывания.

Логично такую горную породу вследствие наличия комплекса реальных деформационных процессов и последующей дезинтеграции называть «упруго-пластично-хрупкой». Подобное поведение проявляет значительный класс горных пород, слагающих геологические разрезы скважин, для бурения которых используются PDC долота.

Целесообразно рассмотреть поведение еще одного класса горных пород при их резании PDC резцом. На первом этапе перемещения реза вдоль плоскости резания вследствие особого типа внутренних связей между частицами породы не проявляются упругие деформации, а происходят перед передней гранью пластичные сдвиги внутренних слоев друг относительно друга (течение). На последующем этапе движения реза перед его передней гранью формируется ядро уплотненной породы (псевдожидкость), которое выдавливает часть массива породы, иногда в виде «сливной стружки».

Такой класс горных пород называют «пластичными горными породами», и они имеют широкое распространение в качестве объекта разрушения долотами PDC.

Вместе с тем необходимо указать на относительность такого деления горных пород по их деформационным свойствам вследствие проявления процессов их скоростного упрочнения. Изменение деформационно-прочностных свойств горных пород при различных скоростях их динамического резания долотами PDC является еще далеко не изученной областью физики разрушения твердых тел применительно к практике проектирования и эксплуатации породоразрушающих инструментов режуще-скалывающего действия [18].

Авторы [36] приводят результаты экспериментов влияния глубины реза δ на изменение площади контакта PDC реза с фаской по передней грани в вертикальной (S_g , 1, рис. 17) и горизонтальной (S_t , 2, рис. 17) проекциях.

В работе не приведен комментарий такого поведения площадей контакта. Однако из рис. 17 видно, что до определенной глубины реза – примерно 0,7 мм – передней гранью служит сама фаска. При больших глубинах резания в работу вступает алмазный слой передней грани реза и темпы роста вертикальной и горизонтальной проекций площади контакта изменяются.

Подобные выводы ранее были сделаны группой исследователей из Парижской горной школы: «Если глубина резания ниже, чем высота фаски, фаска становится режущей плоскостью с более высоким передним углом и силы, действующие на фаску, являются режущими силами по передней грани. Для,

например, угла фаски в 45° и переднего угла реза в 15° реальный отрицательный передний угол наклона реза для малой глубины резания становится 60° » [22. С. 233].

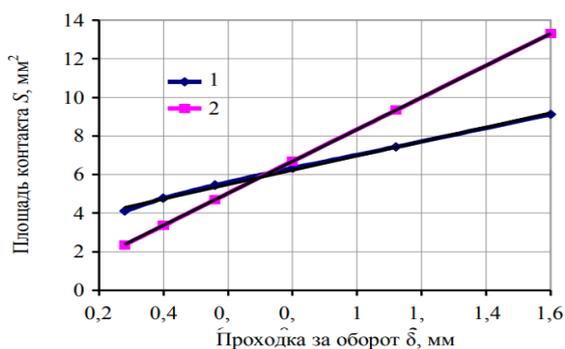


Рис. 17. Зависимость площади контакта S_g (1) и S_t (2) от проходки за оборот δ для реза с фаской ($S_g=3,71\delta+3,26$, $R^2=0,9962$; $S_t=8,29\delta+0,05$, $R^2=1$) [36]

Fig. 17. Dependence of the contact area S_g (1) and S_t (2) on the penetration per revolution δ for a chamfered cutter ($S_g=3,71\delta+3,26$, $R^2=0,9962$; $S_t=8,29\delta+0,05$, $R^2=1$) [36]

Также терминология авторов [36] по «относительным величинам давлений вдавливания и резания», которые рассчитываются из предела текучести и предела твердости горной породы по методу Л.А. Шрейнера (штампа), вызывает некоторые сомнения, т. к. эти характеристики представляют собой безразмерные величины. К примеру, относительные величины давлений вдавливания p_{go} и резания p_{to} рассчитываются исходя из предела текучести породы по штампу p_0 следующим образом (10, 11) [36]:

$$p_{go}=p_g/p_0; \quad (10)$$

$$p_{to}=p_t/p_0. \quad (11)$$

Или для расчета максимальных относительных давлений вдавливания p_{gmax} и резания p_{tmax} используют следующие формулы (12, 13) [36]:

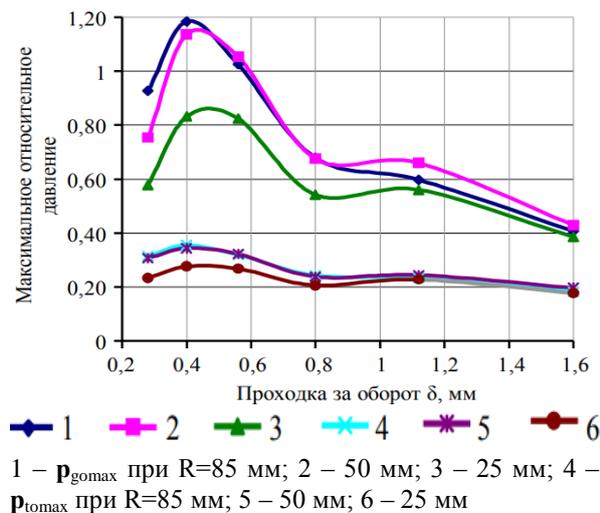
$$p_{gmax}=p_{gmax}/p_{ш}; \quad (12)$$

$$p_{tmax}=p_{tmax}/p_{ш}. \quad (13)$$

Однако содержательная часть указанных безразмерных величин, которые правильно было бы назвать «эффективностью вдавливания» и «эффективностью резания», представляет интерес (рис. 18), т. к. они экспериментально устанавливают фактическое возрастание эффективности работы PDC резцов с ростом глубины резания до определенной ее величины, близкой в данном случае к 2 мм. Подобные по существу результаты показали эксперименты исследователей [6] (рис. 1, 2).

Также из результатов статистического анализа экспериментального материала [36] следует, что влияние проходки за оборот δ и радиуса расположения реза R в лопасти долота на «эффективность вдавливания» p_{go} (10) и «эффективность резания» p_{to} (11) существенно. Данные результаты показывают правильность выводов [18] о наличии зависимости твер-

дости горных пород при их резании PDC резами от времени действия нагрузки.



1 – $p_{гомак}$ при $R=85$ мм; 2 – 50 мм; 3 – 25 мм; 4 – $p_{томак}$ при $R=85$ мм; 5 – 50 мм; 6 – 25 мм

Рис. 18. Зависимости максимальных относительных давлений резов PDC при разрушении пластично-хрупкой породы (резец с острой кромкой)

В последние годы с целью повышения эффективности разрушения более широкого спектра буримых горных пород, включая и твердые, развивается тенденция использования в PDC долотах не только резов с плоской цилиндрической передней гранью (Stratapax™, General Electric), но и конических (рис. 19) [37] (Stinger™, Schlumberger), клиновидных или гребневидных резов Axe™ и долот Axeblade™, Schlumberger (рис. 20) [37], имеющих несколько другую механику разрушения.

Однако сравнительных данных по износостойкости стандартных PDC резов и новых Stinger и Axe в литературе мало.

При работе резца PDC наиболее интенсивному изнашиванию подвергается нижняя, прижатая к забою, режущая кромка передней грани. Поэтому другая разработка Schlumberger – резы ONYX (рис. 21, б) –

позволяет рецам вращаться вокруг своей оси, тем самым используется вся кромка резца [37]. Благодаря этому повышается эффективность, снижается износ.

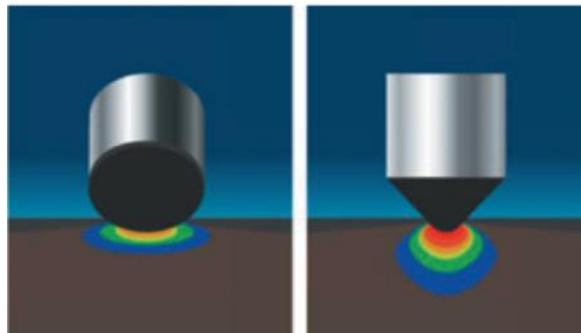


Рис. 19. Моделирование нагрузки, создаваемой Stratapax рецом и Stinger рецом

Fig. 19. Modeling of the load created by the Stratapax cutter and the Stinger cutter

Практика показывает, что по механической скорости они существенно более эффективны по сравнению с цилиндрическими [37].



Рис. 20. Внешний вид резца AXE и долота AXEBLADE

Fig. 20. Appearance of AXE cutter and AXEBLADE bit

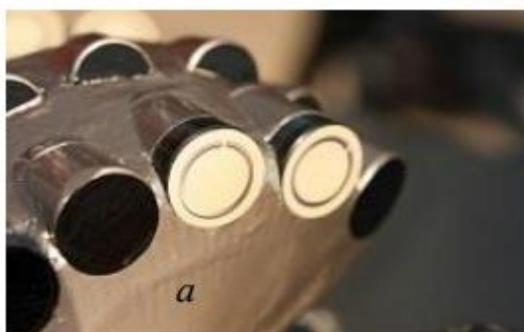
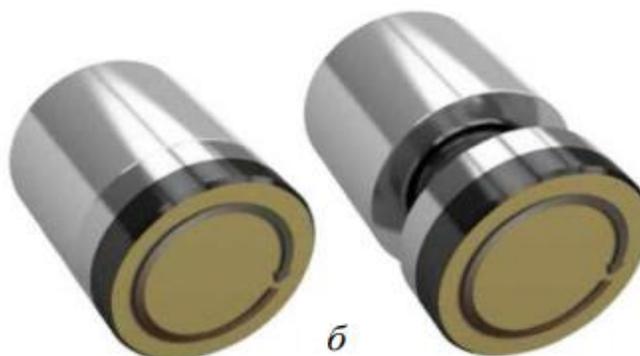


Рис. 21. Внешний вид резца ONYX-360 и лопасти долота с резами ONYX-360

Fig. 21. Appearance of the ONYX-360 cutter and the blades of the bit with ONYX-360 cutters



Резцы ONYX-360 устанавливаются в наиболее нагруженных частях торца долота, чаще всего на периферии (рис. 21, а).

Аналитических исследований, посвященных научному обоснованию предложенных выше конструктивно-технологических решений, немного [38, 39].

Однако важными, на наш взгляд, являются результаты аналитической оценки поведения резцов ONYX, размещенных на лопасти PDC долота, в процессе разрушения горных пород в скважине [40, 41]. В частности, авторы рассчитали не только частоту вращения ONYX резца для конкретных значений механической скорости бурения скважины, но и рациональные геометрические параметры лопасти PDC долота для эффективной эксплуатации резцов ONYX.

Анализируя вышеизложенный материал, можно сделать важный вывод, что многими учеными и научными школами, работавшими над изучением особенностей работы PDC долот, получены значительные результаты, раскрывающие детали взаимодействия в системах «резец–порода», «долото – горная порода», которые необходимо учитывать при проектировании режимов бурения скважин и при разработке конструкции породоразрушающих элементов PDC долот.

В частности, представлены важные результаты о влиянии геометрии и размещения резцов в PDC долоте на силовую картину резания, глубину снимаемой стружки и объем разрушаемой породы. Имеются достоверные результаты по оценке энергоемкости процесса резания горных пород PDC резцами, влиянию поведения «ядра уплотненной горной породы» на эффективность их работы.

Это исключительно полезные и важные результаты многолетней работы коллективов ученых и научных школ в области разрушения горных пород современными PDC долотами.

Вместе с тем вопросу детальной количественной оценки поведения объекта разрушения – горной породы – при работе режущих инструментов, т. е. физическим свойствам породы оказывать сопротивление внедрению и резанию, уделялось меньше внимания.

К примеру, авторы [6, 14] используют в качестве характеристики сопротивляемости горных пород резанию параметр «прочности пород на одноосное сжатие UCS (Uniaxial compressive strength). Исследователи [15] в этих целях используют показатель «твёрдости породы, измеренный при помощи индентора Викерса». Показатель статической твердости горных пород используется авторами [36]. Также встречается в рассмотрении «предел прочности породы на скалывание» на сжатие и т. д.

Все используемые, в том числе и представленные в данном анализе, показатели сопротивляемости горных пород содержат важный недостаток, связанный с тем, что методики их получения не отражают в полной мере механизма, динамики и других условий разрушения горных пород при их резании долотами PDC.

Вместе с тем чем точнее методика количественной оценки показателя твердости пород будет моделировать работу и динамику взаимодействия резцов доло-

та PDC с разрушаемой породой, тем более представительными и полезными будут результаты. Такие показатели динамической твердости можно использовать как при проектировании конструкции долот, так и при разработке режимов их эксплуатации.

В работах [7, 8, 19] получила развитие предложенная авторами методика определения «динамической твердости горной породы» $H_{вд}$, которая основана на точном моделировании процессов работы резцов долот PDC при резании и позволяет получить количественную характеристику твердости исследуемой породы после достижения объемного режима их разрушения. Это достигается путем реализации методики на лабораторном комплексе УМРГП – установке механического резания горных пород.

На рис. 22 схематически представлена конструкция и состав установки: регистрирующее силовое устройство – 3 с резцом – 1 в держателе – 2, которое размещено неподвижно на массивной плите – 4. Закрепленный в подвижном зажимном устройстве – 5 образец горной породы – 6 с помощью специального зубчатого механизма и привода от электромотора – 7 перемещается относительно резца, формируя в породе углубление (рез).

Исследуемыми образцами горных пород может служить скважинный керн различных диаметров (от 40 до 100 мм) и длиной не менее 15 см. Важно, что керн – 6 фиксируется в зажимном устройстве – 5 под определенным, небольшим по величине, но фиксированным для конкретной породы углом α к плоскости движения зажимного механизма. В качестве системы подачи керна – 7 может быть использован плунжер механического строгального станка.

Таким образом, рассмотренное техническое решение позволяет после полного прохода керна вдоль закрепленного PDC резца формировать в образце породы нарастающий по глубине «след» от срезанной горной породы от 0 до h_i .

Уникальность УМРГП заключается в том, что за один эксперимент, т. е. после формирования одного реза, удается смоделировать силовую картину динамического резания керна во всех известных режимах разрушения горных пород – от истирания до объемного режима разрушения горной породы. Последнее исключительно важно для получения необходимых силовых характеристик при расчете характеристики динамической твердости $H_{вд}$.

Силы резания, действующие на резец, осевая сила R_i и сила резания F_i регистрируются цифровым динамометром в диапазоне до 4000 Н с точностью 2 Н и после усиления сигнала записываются на компьютер – 8. Для получения достоверных статистических характеристик силовой картины резания керновый образец проворачивается в зажимном устройстве на определенный угол, примерно 5–8 градусов, и закрепляется вновь. Глубина реза фиксируется микрометром с точностью до 0,1 мм. PDC резец диаметром 13 мм фиксируется в держателе динамометра с передним углом в 10 градусов для мягких пород, 25 градусов – для пород средней прочности и 30 градусов – для более прочных пород, которые по-

добраны опытным путем, но на основе литературных рекомендаций.

Для упрощения лабораторных испытаний и интерпретации полученных данных методикой не предусматривалось использование промывочных агентов и моделирование термобарических забойных условий. Удаление стружки из резцов производилось за счет сил гравитации.

На следующем этапе, после обработки данных динамометрии, методика [18] предлагает определять характеристику твердости испытуемой горной породы путем отнесения осевой реакции R_0 , возникающей при резании керна при достижении объемного режима разрушения, и соотношения этой силы к площади контакта стандартного PDC резца с породой S_k (14):

$$H_{вд} = \frac{R_0}{S_k}. \quad (14)$$

Таким образом, схема получения и обработки исходных силовых характеристик для расчета показателя $H_{вд}$ и функции $H_{вдi}=f(V_{рез})$ не только воспроизводит работу резца PDC во всех режимах разрушения горной породы при резании, но и учитывает изменение сопротивления горной породы внедрению при соответствующем изменении скорости процесса резания $V_{рез}$.

Подчеркнем, что важным прикладным и научным аспектом предложенного в [18] метода является представление сопротивления горной породы внедрению при ее резании (твердости) как функции от скорости процесса разрушения, или скорости перемещения режущего элемента (рис. 23).

Полученная зависимость показывает масштабы времени, в течение которого разрушаемая порода находится под нагрузкой перемещающегося резца.

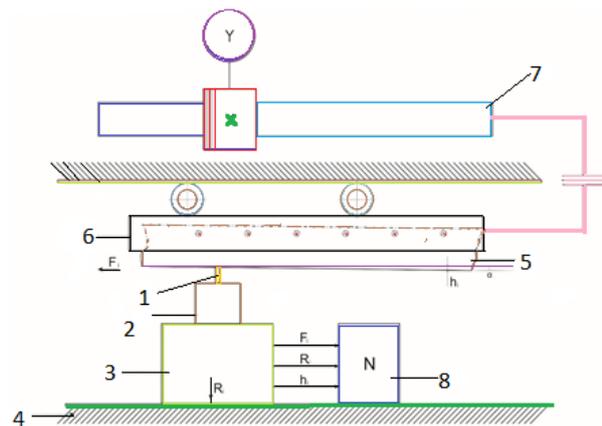


Рис. 22. Комплекс УМРГП для определения динамической твердости горных пород [18]

Fig. 22. UMRGP complex for determining the dynamic hardness of rocks [18]

В частности, для диапазона скоростей, представленных на рис. 23, при ширине контактной площадки на поверхности резания в 9 мм (глубина реза ~2 мм) этот диапазон находится в пределах от $4 \cdot 10^{-2}$ до $4 \cdot 10^{-4}$ с. Такой диапазон долговечности твердого тела под нагрузкой близок к оценке автора [20], по данным ко-

торого время статического и динамического взаимодействия находится в пределах 10^3-10^4 с.

Таким образом, в основу методики [7] положен не критерий предельной твердости горной породы, а концепция предельной прочностной функции, увязывающей статическое и динамическое ее разрушение при резании PDC элементом в единый последовательный процесс. Построение предельных прочностных функций для горных пород, слагающих разрезы нефтегазовых месторождений, позволит проектировать более эффективные режимы эксплуатации современных PDC долот и их конструкции.

Изменение прочностной характеристики разрушаемой горной породы с увеличением скорости резания влияет на результаты эксплуатации долота PDC. В частности, исследованиями показано, что с увеличением частоты вращения механическая скорость бурения при неизменной нагрузке G_0 меняется незначительно либо не меняется совсем [18, 40] и мало зависит от режима разрушения: поверхностного, усталостного или объемного.

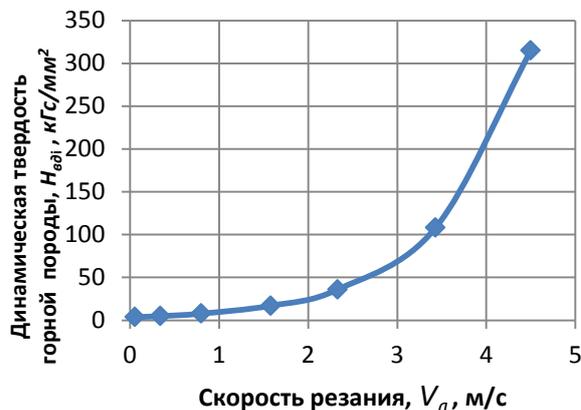


Рис. 23. Зависимость величины динамической твердости горной породы $H_{вд}$ от скорости резания v_l при постоянной величине срезаемого резцом слоя $h=const$; ширина площадки контакта резца с горной породой на плоскости резания $\delta=9$ мм

Fig. 23. Dependence of the value of rock dynamic hardness $H_{вд}$ on the cutting speed v_l at a constant value of the layer cut by the cutter $h=const$; the width of the cutter contact area with the rock on the cutting plane $\delta=9$ mm

Увеличение объема механической работы разрушения горных пород с повышением скорости вращения долота при G_0 ограничивается снижением величины внедрения резцов в разрушаемую породу. Иными словами, проявляется процесс «выталкивания долота» за счет эффекта «динамического упрочнения» разрушаемой горной породы [18, 19].

Данный эффект представлен на рис. 24 экспериментальным результатом изменения глубины резания за оборот долотом PDC диаметром 215,9 мм при постоянной нагрузке в 3,5 тс от частоты его оборотов. При таком характере снижения глубины резания с ростом скорости вращения долота скорость бурения практически не растет.

Еще раз подчеркнем, что физической основой такого поведения горных пород под действием динамических сил резания может служить зависимость скорости распространения процесса отделения частиц породы от уровня внешнего разрушающего напряжения согласно термофлуктуационной теории С.Н. Журкова, представленной выражением (9).

Важным для понимания и оценки поведения горных пород в процессе их резания долотами PDC является констатация того факта, что время на протекание процессов разрушения ограничено конкретной скоростью перемещения резцов долота по забою, или частотой оборотов инструмента.

На основании этого необходимо признать, что увеличение линейных скоростей перемещения резцов по разрушаемой горной породе и, следовательно, уменьшение времени на процессы разрушения для сохранения глубины резания требует увеличения внешней осевой нагрузки на долото. На практике, при необходимости изменения режимов бурения скважин, так и поступают: увеличение частоты оборотов PDC долота сопровождается увеличением осевой нагрузки.

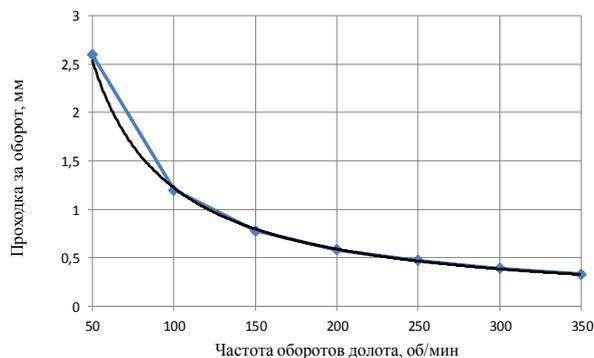


Рис. 24. Характер изменения глубины срезаемого слоя с ростом частоты оборота долота при неизменной нагрузке [18]

Fig. 24. Nature of the change in the cut layer depth with an increase in the bit rotation frequency at constant load [18]

Однако, если процесс бурения скважины идет при неизменной осевой нагрузке на долото, уменьшение времени взаимодействия резцов и породы в каждой конкретной точке разрушаемого забоя приводит к уменьшению глубины распространения дезинтеграционных процессов в монолите горной породы. Следовательно, глубина динамического резания породы для конкретной нагрузки снижается (рис. 24), что также проявляется при реальной работе инструментов PDC.

Наконец, если фиксируется неизменной глубина динамического резания, происходит возрастание реакции породы или силы, необходимой для увеличения скорости распространения разрушающих процессов в породе и сохранения объемов разрушения (рис. 12). Данный факт подтвержден экспериментально, что в определенной степени представлено в работах [16, 39].

Выводы

1. Исследования значительного числа ученых [6, 15, 18, 32] показали закономерность уменьшения энергетических затрат (MSE, УЭР), необходимых для резания породы, и рост эффективности резания с увеличением глубины резания PDC резцами с последующей стабилизацией этих характеристик. Такие изменения показателей резания связаны со сменой режимов разрушения горных пород – от режима истирания до объемного режима.
2. Среди исследователей [23–28] нет единого мнения о наличии оптимального переднего угла резания и обоснования его эффективного значения. Подчеркивается только общая закономерность роста отрицательного переднего угла PDC резца с повышением прочностных характеристик буримых горных пород от 10 до 40 градусов.
3. Наличие (постоянного или дискретного) ядра горной породы впереди движущегося PDC резца установлено практически всеми учеными по разрушению горных пород резанием. Однако рядом исследователей [23, 24] предложена конкретная модель взаимодействия в системе «PDC резец – горная порода» с рассмотрением закономерностей поведения формируемого ядра измельченных материалов по режущей кромке и влиянием его на силовую картину процесса.
4. В последние годы практика проведения буровых работ с использованием PDC долот показала использование новых разнообразных форм и конструкций композитных резцов (Axe, Sindit, Stinger, ONIX и другие), имеющих более сложный механизм взаимодействия с горной породой при резании [32, 33, 34]. Вместе с тем аналитических исследований, посвященных научному обоснованию предложенных выше конструктивно-технологических решений, немного.
5. В работах [7, 12, 13] рассматриваются предложения по использованию в процедуре проектирования параметров режима бурения скважин и конкретного долота временной функциональной характеристики твердости горных пород для работы инструментами PDC:
 - формирование технологии проектирования размещения на лопасти долота PDC нескольких режущих элементов (резцов), имеющих пропорционально путям резания различные скорости динамического процесса резания;
 - разработка принципиально новых конструкций буровых долот, исключаящих различие в степени нагружения режущих элементов, расположенных на периферии и на внутренних радиусах инструмента;
 - построение паспортов горных пород на основе временной функциональной характеристики их твердости для классификационных целей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пономарева Л. Лучшие друзья нефтяников – алмазы. PDC долота все более востребованы на российских месторождениях // Нефть и Газ ЕВРАЗИЯ. – 2012. – № 10. – С. 20–23.
2. Langeveld C. PDC Bit Dynamics // IADC/SPE. – New Orleans, Louisiana, USA, 2021. – P. 8–21.
3. A novel method for measuring and analyzing the interaction between drill bit and rock / X. Wang, Z. Wang, D. Wang, L. Chai // Measurement. – 2018. – V. 121. – P. 344–354.
4. Teale R. The concept of specific energy in rock drilling // Rock Mech. Mining Science. – 1965. – V 2. – P. 53–57.
5. Warren T., Sinor A. Drag bit performance modelling // 61st Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers. – New Orleans, LA, 1986. – P. 5–8.
6. Majidi R., Miska S., Tammineni S. Wiertnictwo // Nafta Gas. – 2011. – V. 28. – P. 1–2.
7. Борисов К.И. Методика оценки динамических прочностных свойств горных пород и эффективности процесса разрушения горных пород инструментами режущо-скалывающего действия // Бурение и нефть. – 2008. – № 1. – С. 24–27.
8. Борисов К.И. Прикладные аспекты нового научного метода оценки свойств и эффективности процесса разрушения горных пород // Бурение и нефть. – 2010. – № 3. – С. 24–27.
9. Борисов К.И. Динамика работы резцов в процессе разрушения горных пород инструментами режущо-скалывающего действия типа PDC // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 1. – С. 161–164.
10. Спивак А.И., Попов А.Н. Разрушение горных пород при бурении скважин. – М.: Недра, 1979. – 231 с.
11. Эйгелес Р.М. Разрушение горных пород при бурении скважин. – М.: Недра, 1971. – 231 с.
12. Борисов К.И. Современные методы оценки сопротивления горных пород резанию-скалыванию при бурении скважин долотами PDC. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 166 с.
13. Борисов К.И. Количественная оценка важнейших силовых характеристик разрушения горных пород при резании // Проблемы научно-технического прогресса в бурении скважин. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – С. 38–42.
14. Xianqun He, Chaoshui Xu. Specific cutting energy as an indicator of the critical depth of transition between different modes of rock cutting // Rock Mechanics Engineer. – 2016. – V. 49. – P. 1461–1478.
15. Detournay E., Defourny P. A phenomenological model for the drilling action of drag bits // Rock Mech Min Science Geomech. – 1992. – V. 29. – P. 13–23.
16. The effects of back rake and side rake angles on mechanical specific energy of single PDC cutters with selected rocks at varying depth of cuts and confining pressures / V. Rajabov, S. Miska, L. Mortimer, E. Ozbayoglu // IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition. – San Diego, California, USA, 2012. – P. 28–37.
17. Vtorushin E.V., Dorovsky V.N. Cutting forces estimation with non-Euclidean model of inelastic deformations applied to rock cutting. – San Francisco: ARMA, American Rock Mechanics Association, 2017. – V. 4. – 137 p.
18. Борисов К., Рубцов В. Аналитическое исследование временной прочностной характеристики горной породы при резании-скалывании резцами PDC // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325. – № 1. – С. 172–180.
19. Борисов К.И. Научный метод оценки эффективности динамических процессов разрушения горных пород при бурении скважин современными инструментами режущо-скалывающего действия: дисс. ... д-ра техн. наук. – Томск, 2012. – 180 с.
20. Лавренко С.А. Обоснование параметров исполнительных органов комплекса для проведения вспомогательных выработок в условиях кембрийских глин: дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2014. – 181 с.
21. Журков С., Куксенко В. Прогнозирование разрушения горных пород // Математика. Академия наук СССР. Сер. Физика Земли. – 1977. – № 6. – С. 11–25.
22. Нейштетер И.А. Кинетическая природа статического и динамического разрушения горных пород // Совершенствование техники и технологии бурения скважин на твердые полезные ископаемые. Вып. 21: Межвузовский научный тематический сборник. – Екатеринбург: Уральская государственная горно-геологическая академия, 1998. – С. 53–67.
23. Gerbaud L., Menand S., Sellami. PDC-Bits: all comes from the cutter/rock interaction // École des Mines de Paris. IADC/SPE Drilling Conference. – Miami, Florida, USA, 2006. – P. 208–239.
24. Нескоромных В.В. Разрушение горных пород при бурении скважин. – М.: ИНФРА-М; Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. – 336 с.
25. Hibbs L.E. Jr., Flom D.G. Diamond compact cutter studies for geothermal bit design // ASME, Pressure Vessel Technology. – 1978. – P. 406–416.
26. Hoover E.R., Middleton J.N. Laboratory evaluation of PDC drill bits under high-speed and high-wear conditions // Journal of Petroleum Technology. – 1981. – V. 2. – P. 2316–2321.
27. Hough C. The effect of back rake angle on the performance of small-diameter polycrystalline diamond rock bits // ANOVA Tests. Journal of Energy Resources Technology. – 1986. – V. 18. – P. 414–438.
28. Karasawa H., Misawa S. Laboratory testing to design PDC bits for geothermal well drilling // Drilling Technology ASME. – 1992. – V. 40. – P. 135–141.
29. Li X., Hood M., Xian X. Wear and damage to PDC bits // SPE 26294. – 1993. – V. 1. – P. 80–112.
30. Sinor L., Powers J., Warren T. The effect of PDC cutter density, back rake, size and speed on performance // IADC SPE. – 1998. – V. 1. – P. 306–313.
31. Coudyzer C., Richard T. Influence of the back and side rake angles in rock cutting // AADE National Technical Conference and Exhibition. – Wyndam, Houston, TX, 2005. – P. 41–56.
32. Третьяк А.Я., Борисов К.А. Классификация поломок пластин PDC, вызываемых забойными вибрациями при бурении скважин // Результаты исследований-2020. Материалы V Национальной конференции профессорско-преподавательского состава и научных работников ЮРГПУ (НПИ). – Новочеркасск, 2020. – С. 252–254.
33. Research on drilling response characteristics of two-wing PDC bit / L. Cancan, X. Zheng, G. Wang, M. Xu, Z. Li. – Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2020. – V. 406. – 706 p.
34. Снижение вибраций в процессе бурения путем совершенствования конструкции роддолот / Р.Р. Мингазов, Г.Г. Ишбаев, А.Г. Балута, А.Ю. Драган, В.У. Ямалиев // Бурение и нефть. – 2021. – № 4. – С. 14–17.
35. Drill bit: Patent 2020/0149350 A1 US. Fil. 9.11.2019; Pub. Date: 14.05.2020.
36. Трушкин О.Б., Акчурин Х.И. Давление резцов PDC на пластично-хрупкую горную породу в процессе ее разрушения // Записки Горного института. – 2020. – Т. 244. – С. 448–453.
37. The film premiere from Schlumberger / D. Gunich, S. Pisotskiy, V. Riabov, S. Sharafutdinov // Drilling and Oil. – 2017. – V. 1. – P. 284–298.
38. Investigation of the cross-cutting polycrystalline diamond compact bit drilling efficiency / C. Chang, Y. Yang, H. Ren, C. Cai, Y. Liu, M. Yang // Shock and Vibration. – 2021. – V. 30. – P. 15–27.
39. Warren T., Sinor L. PDC bits: what's needed to meet tomorrow's challenge // SPE. – 1994. – V. 3. – P. 279–288.
40. Нескоромных В.В., Попова М.С., Баочанг Л. Разрушение горных пород при бурении скважин алмазным буровым инструментом: монография. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2020. – 268 с.
41. Нескоромных В.В., Попова М.С., Парахонько Е.В. Разработка породоразрушающего инструмента с резцами PDC // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 2. – 131–138.

Поступила 18.05.2022 г.

Информация об авторах

Борисов К.И., доктор технических наук, профессор отделения нефтяного дела Школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 622.243.2

MODERN METHODS OF EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF ROCK DESTRUCTION BY CUTTING WITH PDC BITS

Konstantin I. Borisov,
kibor@tpu.ru

National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634504, Russia.

The relevance of the work is justified by the need to study interaction of cutting elements of modern PDC (Polycrystalline Diamond Compact) bits with rock, and, as a result, the presence of various approaches in the world scientific centers to assess the mechanism of dynamic penetration of PDC cutters into rocks during well drilling.

The purpose: detailed analysis of the current state and prospects for the development of scientific research for a comprehensive assessment of the dynamic processes of rock cutting with PDC bits.

Methods: theoretical analysis of the problems of the efficiency of rock destruction by cutters and modern PDC bits; application of mathematical and physical modeling of rock cutting processes, fluctuation theory of solid strength to describe the patterns of rock behavior during the operation of PDC cutters; comparative assessments of the study of processes and mechanisms of static and dynamic embedding when cutting rock with single elements and PDC bits, based on research conducted by the world's leading scientific schools in this field.

Results. The paper introduces the results of research conducted by the world's leading schools on various fundamental aspects of the interaction of the executive bodies of PDC bits with destructible rocks. It is revealed that many research results give a complete qualitative picture of the work of PDC drill bits. However, there are not many most important and accurate quantitative characteristics of rock cutting processes with modern PDC chisels in the scientific literature. The ways of development of new methods of increasing the efficiency of rock cutting based on more accurate methods of assessing their behavior during cutting by PDC bits are considered. One of the considered promising techniques allows us to experimentally obtain a characteristic of the «dynamic hardness of rocks», which can be successfully used for the design of drilling modes and the design of PDC bits.

Key words:

Rock cutting, oil well drilling, PDC bits, rock hardness, cutting forces, modeling rock destruction processes, bit rotation frequency, back rake angle of the cutter, side rake angle of the cutter.

REFERENCES

- Ponomareva L. A Best Friends Petroleum man – diamonds. PDC bit more in demand in Russian fields. *Oil and Gas Eurasia*, 2012, no. 10, pp. 20–23. In Rus.
- Langeveld C.J. PDC bit dynamics. *IADC/SPE Drilling Conference*. New Orleans, Louisiana, 2021. pp. 18–21.
- Wang X., Wang Z., Wang D., Chai L. A novel method for measuring and analyzing the interaction between drill bit and rock. *Measurement*, 2018, vol. 121, pp. 344–354.
- Teale R. The concept of specific energy in rock drilling. *Rock Mechanics Mining Sciences*, 1965, vol. 2, pp. 53–57.
- Warren T., Sinor A. Drag bit performance modelling. *61st Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers*. New Orleans, LA, 1986. pp. 5–8.
- Majidi R., Miska S., Tamminen S. Wiertnictwo. *Nafta Gas*, 2011, vol. 28, pp. 1–2.
- Borisov K. Methodology for assessing the dynamic strength properties of rocks and the effectiveness of the process of cutting formation by cutting tool. *Drilling and oil*, 2008, no. 1, pp. 24–27. In Rus.
- Borisov K. Applied aspects of a new scientific method for assessing the properties and effectiveness of the process of cutting rocks. *Drilling and Oil*, 2010, no. 3, pp. 24–27. In Rus.
- Borisov K. Dynamics of the work of cutters in the process of cutting rocks by PDC tools. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 317, no. 1, pp. 161–164. In Rus.
- Spivak A., Popov A. *Razrushenie gornykh porod pri burenii skvazhin* [Rock cutting while drilling]. Moscow, Nedra Publ., 1979. 231 p.
- Eigeles R. *Razrushenie gornykh porod pri burenii skvazhin* [Rock cutting while drilling]. Moscow, Nedra Publ., 1971. 231 p.
- Borisov K. *Sovremennye metody otsenki soprotivleniya gornykh porod rezaniyu-skalyvaniyu pri burenii skvazhin dolotami PDC* [Modern methods for assessing the resistance of rocks to cutting when drilling wells with PDC bits: monograph]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. House, 2013. 166 p.
- Borisov K. Kollichestvennaya otsenka vazhneyshikh silovykh kharakteristik razrusheniya gornykh porod pri rezanii [Quantitative assessment of the most important force characteristics of rock destruction during cutting]. *Problemy nauchno-tehnicheskogo progressa v burenii skvazhin* [Problems of scientific and technological progress in drilling wells]. Tomsk, TPU Publ. house, 2004. pp. 38–42.
- Xianqun He, Chaoshui Xu. Specific cutting energy as an indicator of the critical depth of transition between different modes of rock cutting. *Mechanics Rock Engineering*, 2016, vol. 49, pp. 1461–1478.
- Detournay E., Defourny P. A phenomenological model for the drilling action of drag bits. *Rock Mechanics Mining Sciens Geomech*, 1992, vol. 29, pp. 13–23.
- Rajabov V., Miska S., Mortimer L., Yu M., Ozbayoglu E. The effects of back rake and side rake angles on mechanical specific energy of single PDC cutters with selected rocks at varying depth of cuts and confining pressures. *IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition*. San Diego, California, USA, 2012. Vol. 2, pp. 37–53.
- Vtorushin E., Dorovsky V. *Cutting forces estimation with non-Euclidean model of inelastic deformations applied to rock cutting*. San Francisco, California, USA, ARMA, American Rock Mechanics Association, 2017. pp. 1–37.
- Borisov K., Rubtsov V. Analytical study of the time strength characteristics of rock during cutting and chipping with PDC cutters. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 325, no. 1, pp. 172–180. In Rus.
- Borisov K. *Nauchny metod otsenki effektivnosti dinamicheskikh protsessov razrusheniya gornykh porod pri burenii skvazhin sovremennymi instrumentami rezhushche-skalyvayushchego deystviya*. Dis. Dokt. nauk [A scientific approach to evaluating effectiveness of dynamic processes of rock cutting while drilling wellbores using modern cutting tools. Dr. Diss.] Tomsk, 2012. 180 p.
- Lavrenko S.A. *Obosnovanie parametrov ispolnitelnykh organov kompleksa dlya provedeniya vspomogatelnykh vyrabotok v usloviyakh kembriyskikh glin*. Dis. Kand. nauk [Substantiation of

- the parameters of the executive bodies of the complex for carrying out auxiliary workings in the conditions of Cambrian clays. Cand. Diss.], St. Petersburg, 2014. 181 p.
21. Zhurkov S. Kuksenko V. Predicting the destruction of rocks. *Math. USSR Academy of Sciences, Ser. Physics of the Earth*, 1977, no. 6, 11 p. In Rus.
 22. Neishteter I. Kineticheskaya priroda staticheskogo i dinamicheskogo razrusheniya gornykh porod [Kinetic nature of static and dynamic destruction of rocks]. *Sovershenstvovanie tekhniki i tekhnologii bureniya skvazhin na tverdye poleznye iskopaemye. Vyp. 21. Mezhhuzovskiy nauchnyy tematicheskyy sbornik* [Improving the technique and technology of drilling wells for solid minerals. Issue 21: Interuniversity scientific thematic collection]. Yekaterinburg, Ural State Mining and Geological Academy Publ., 1998. pp. 53–67.
 23. Gerbaud L., Menand S., Sellami H. PDC-bits: all comes from the cutter/rock interaction. *École des Mines de Paris, IADC/SPE Drilling Conference*. Miami, Florida, USA, 2006. pp. 21–23.
 24. Neskornomykh V., Borisov K. Analytical study of the established depth of cutting during the destruction of rock by PDC cutters. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 1, pp. 191–195. In Rus.
 25. Hibbs L., Flom D. Diamond compact cutter studies for geothermal bit design. *ASME, Pressure Vessel Technology*, 1978, vol. 3, pp. 406–416.
 26. Hoover E., Middleton J. Laboratory evaluation of PDC drill bits under high-speed and high-wear conditions. *Journal of Petroleum Technology*, 1981, vol. 3, pp. 2316–2321.
 27. Hough C. The effect of back rake angle on the performance of small-diameter polycrystalline diamond rock bits. *ANOVA Tests. Journal of Energy Resources Technology*, 1986, vol. 18, pp. 414–438.
 28. Karasawa H., Misawa S. Laboratory testing to design PDC bits for geothermal well drilling. *Drilling Technology, ASME*, 1992, vol. 40, pp. 135–141.
 29. Li X., Hood M., X. Xian Wear and Damage to PDC bits. *SPE 26294*, 1993, vol. 1, pp. 80–112.
 30. Sinor L., Powers J., Warren T. The effect of PDC cutter density, back rake, size and speed on performance. *IADC, SPE*, 1998, vol. 1, pp. 306–313.
 31. Coudyzer C., Richard T. Influence of the back and side rake angles in rock cutting. *AADE National Technical Conference and Exhibition*. Wyndam, Houston, TX, 2005, pp. 41–56.
 32. Tretyak A.Ya., Borisov K.A. Klassifikatsiya polomok plastin PDC, vyzvaemykh zaboynymi vibratsiyami pri burenii skvazhin [Classification of PDC plate fractures caused by downhole vibrations during well drilling]. *Rezultaty issledovaniy-2020. Materialy V Natsionalnoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava i nauchnykh rabotnikov YuRGPU (NPI)* [Research results-2020. Materials of the V National Conference of the teaching staff and researchers of the YRSPU (NPI)]. Novocherkassk, 2020. pp. 252–254.
 33. Cancan Liu, Xigui Zheng, Gang Wang, Mengbin Xu, Zhishang Li. *Research on drilling response characteristics of two-wing PDC Bit*. Xuzhou, China, China University of Mining & Technology, 2020. Vol. 406, 706 p.
 34. Mingazov R.R., Ishbaev G.G., Baluta A.G., Dragan A. Yu., Yamaliev V.U. Reducing vibrations while drilling by improving the design of the bit. *Drilling and oil*, 2021, no. 4, pp. 14–17. In Rus.
 35. Silveus J., Skinner A. *Drill bit*. Patent 2020/0149350 A1 US, 2020.
 36. Trushkin O., Akchurin H. Pressure of PDC cutters on plastic-brittle rock in the process of its cutting. *Notes of the Mining Institute*, 2020, vol. 244, pp. 448–453. In Rus.
 37. Gunich D., Pisotskiy L., Riabov V., Sharafutdinov R. The film premiere from Schlumberger. *Drilling and Oil*, 2017, vol. 1, pp. 25–28.
 38. Chun-Liang Zhang, Ying-Xin Yang, Hai-Tao Ren, Can Cai, Yong Liu, Ming Yang. Investigation of the cross-cutting polycrystalline diamond compact bit drilling efficiency. *Shock and Vibration*, 2021, vol. 30, pp. 15–27.
 39. Warren T., Sinor L. PDC bits. What's needed to meet tomorrow's challenge. *SPE*, 1994, vol. 3, pp. 279–288.
 40. Neskornomykh V., Popova M., Baochang L. *Razrushenie gornykh porod pri burenii skvazhin almaznym burovym instrumentom. Monografiya* [Destruction of rocks when drilling wells with a diamond drilling tool. Monography]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University Publ., 2020. 268 p.
 41. Neskornomykh V., Popova M., Parakhonko E. Development of a rock-breaking tool with PDC cutters. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 2, pp. 131–138. In Rus.

Received: 18 May 2022.

Information about the authors

Konstantin I. Borisov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.