

УДК 622.24

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ-СКАЛЫВАНИЯ ГОРНОЙ ПОРОДЫ ДОЛОТОМ С РЕЗЦАМИ PDC

В.В. Нескоромных, К.И. Борисов*

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

E-mail: sovair@bk.ru

*Томский политехнический университет

E-mail: kibor@tomline.ru

Рассмотрены актуальные вопросы механизма взаимодействия режущих элементов современных породоразрушающих инструментов PDC с горной породой в стационарном режиме ее резания-скалывания. Установлены особенности влияния геометрии, размещения и динамики резцов PDC на процессы разрушения горных пород при бурении скважин. На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований сформулированы предложения по важным аспектам оптимизации проектирования долот PDC.

Ключевые слова:

Долото, PDC, угол резания, силы резания, ядро сжатия, линейная скорость резцов, проектирование.

Key words:

Bit, PDC, cutting angle, cutting forces, compression core, linear speed of cutters, design.

Для бурения скважин различного назначения в мягких горных породах средней твердости, а также частично в твердых породах в большом объеме применяются долота с поликристаллическими алмазно-твердосплавными резцами типа PDC. Перспективность данного вида вооружения долот доказана высокими результатами их применения. Практика показывает, что при бурении глубоких скважин долота PDC обеспечивают проходку на инструмент более 1000 м при средней механической скорости бурения до 35...40 м/ч. Поэтому в настоящее время в Сибирском регионе объемы проходки с использованием долот класса PDC достигают 85...90 % от общих объемов промышленного бурения скважин.

В то же время следует отметить, что для дальнейшей оптимизации проектирования долот PDC при расчете схем размещения резцов на торце долота необходимо более точное понимание механики процессов резания-скалывания, которое бы учитывало все основные аспекты производительного бурения и обеспечения высокой износостойкости породоразрушающих резцов.

В данной работе выполнен анализ установившегося режима резания-скалывания породы резцом PDC.

При перемещении резца под действием крутящего момента при установившемся режиме и глубине резания-скалывания породы будет справедлива следующая схема работы резца (рис. 1).

Важным для получения результирующей зависимости влияния параметров на глубину резания является обоснование направления действия результирующей силы R при установившемся режиме резания-скалывания, при котором при неизменных внешних параметрах глубина резания-скалывания породы не меняется.

Усилие R – результирующая осевой силы $P_{ос}$ и тангенциальной силы резания-скалывания породы

F_p . Если эта сила ориентирована под прямым углом к плоскости резца, то её проекция на плоскость резца равна нулю. Это режим установившегося процесса без изменения глубины резания скалывания h (рис. 2, а).

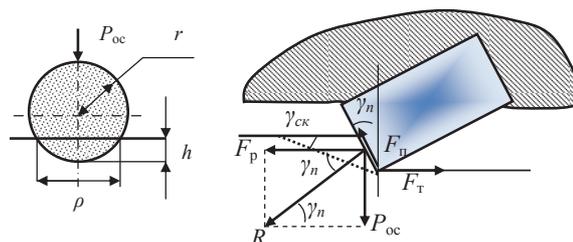


Рис. 1. Схема к анализу процесса-резания скалывания породы резцом PDC

Если результирующая R направлена вниз и не образует прямого угла с плоскостью резца, то появляется сила T , которая нарушает равновесие и вызывает заглубление резца от h к h_n (рис. 2, б).

Такая ситуация возможна при повышении осевого усилия или мгновенного снижения усилия резания-скалывания, вызванного, например, ослаблением породы и ее сопротивления вследствие появления трещины, каверны в породе, снижения плотности, твердости или упруго-пластичных свойств.

В случае, если результирующая R ориентирована вверх (рис. 2, в), что может быть связано со снижением осевого усилия на инструмент или повышением сопротивления породы резанию-скалыванию породы (рост тангенциального усилия), например, вследствие повышения частоты вращения инструмента, то проекция T ориентирована вверх, что неизбежно вызывает снижение глубины резания-скалывания от h к h_n .

Таким образом, векторная направленность результирующей R , вызванная изменением осевой силы и тангенциальной силы резания-скалывания,

меняет баланс сил при разрушении и определяет глубину резания-скалывания.

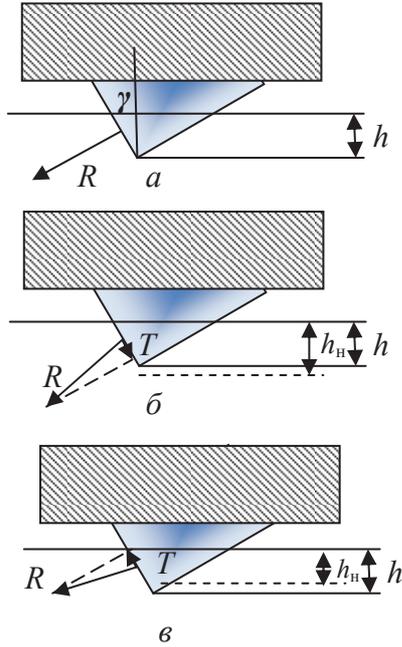


Рис. 2. Схемы для анализа механики резания-скалывания резцом

Колебания величины и направления силы R при резании-скалывании происходят постоянно, но установившийся режим этого процесса при неизменном h возможен только тогда, когда эта сила направлена под прямым углом к плоскости реза.

Важным, с нашей точки зрения, является также рассмотрение роли и поведения «ядра сжатия», формируемого в разрушаемой горной породе резцом в процессе резания-скалывания. Ядро сжатия породы влияет на распределение сил и дает понимание важности коэффициента внутреннего трения, который участвует в представляемых формулах.

Реакция породы N (рис. 3) воздействует не на сам резец, а на ядро сжатия породы. Таким образом, усилие R тратится, прежде всего, на деформирование породы в ядре сжатия, создавая напряжения, достаточные для скалывания породы [1], то есть основные траты усилия R – это процессы деформирования породы и преодоление сил внутреннего трения в ядре. Линия скалывания породы перед ядром сжатия ориентируется с учетом размеров и геометрии ядра сжатия и переднего угла наклон реза.

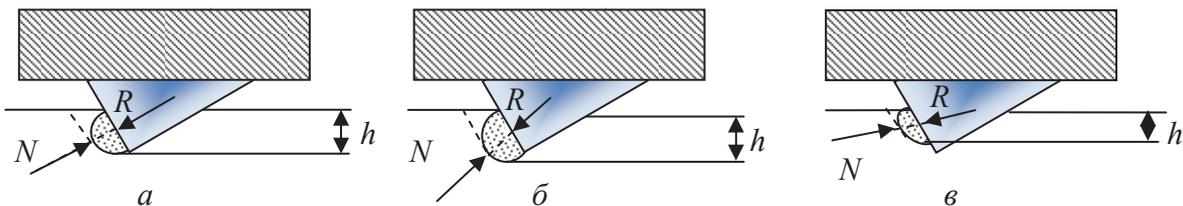


Рис. 3. Схемы трансформации ядра сжатия породы при установившемся режиме резания-скалывания (а), заглуплении реза (б) и повышении сопротивления резанию-скалыванию (в)

Размеры ядра сжатия существенно зависят от упруго-пластичных и прочностных свойств горных пород. В мягких породах ядро сравнительно большое и слабо уплотненное, поскольку порода от действия ядра выходит на поверхность при малом усилии резания. В твердых породах ядро имеет меньший размер, и оформлено в виде полусферы или сегмента эллипсоида. К примеру, если усилие R направлено под прямым углом к плоскости реза, то форма ядра сжатия более симметричная (рис. 3, а). Если усилие R ориентировано вниз (рис. 3, б), то и ядро сжатия будет деформировано в глубину, увеличивая глубину резания-скалывания (глубина зависит от глубины проникновения ядра сжатия породы). Если усилие R ориентировано вверх, то ядро ориентировано к поверхности забоя, глубина борозды резания-скалывания снижается (рис. 3, в).

На базе аналитического заключения равнодействующее усилие R сил резания-скалывания F_p и осевого усилия P_{oc} (рис. 2) определим из соотношения

$$R = \frac{F_p}{\cos \gamma_n} = \frac{P_{oc}}{\sin \gamma_n}.$$

Усилие резания-скалывания породы F_p определим, рассмотрев схему на рис. 1.

$$F_p = S_{ck} \sigma_{ck} (1 + \operatorname{tg} \varphi) + f P_{oc}.$$

Форма площадки скалывания, формируемая резцом PDC, представляет собой, при некоторых упрощениях, эллипс с полуосями $0,5\rho$ и AB (рис. 1). Размер S_{ck} рассчитываем как площадь половины эллипса.

$$S_{ck} = 0,5 \pi \rho \cdot AB = 0,5 \pi \sqrt{dh} \cdot \frac{h}{\sin \gamma_{ck}};$$

$$F_p = \frac{\sigma_{ck} \pi \sqrt{dh} h (1 + \operatorname{tg} \varphi)}{\sin \gamma_{ck}} + f P_{oc}.$$

Если учесть возможность установки реза с поворотом в направлении резания-скалывания породы φ_p (рис. 4), ширина площадки скалывания в направлении перемещения реза будет меньше на величину $\cos \varphi_p$. В формуле для расчета F_p это получит отражение следующим образом:

$$F_p = \frac{\sigma_{ck} \pi \sqrt{dh} h \cos \varphi_p (1 + \operatorname{tg} \varphi)}{\sin \gamma_{ck}} + f P_{oc}.$$

Используя ранее полученное выражение для расчета F_p можно определить глубину резания-скалывания породы h из равенства полученных формул. Глубина резания-скалывания будет равна:

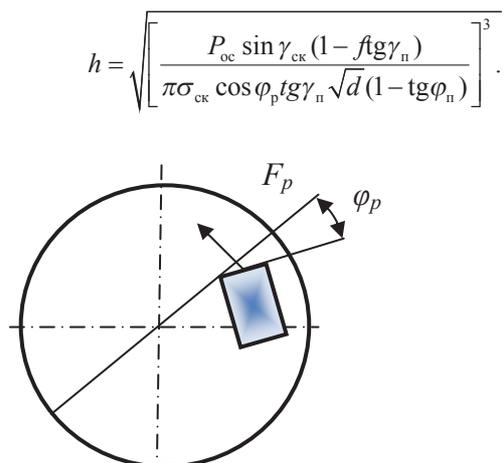


Рис. 4. Схема размещения реза с поворотом на угол φ_p относительно направления резания-скалывания породы

Из полученной формулы следует ряд важных выводов о влиянии на глубину резания-скалывания породы резцом PDC таких параметров, как передний угол реза γ_n , угол поворота реза относительно направления резания-скалывания породы φ_p , а также изменчивости предела прочности горной породы на скалывание σ_{ck} , вследствие повышения скорости перемещения реза, например, при повышении частоты вращения долота. В этом случае предел прочности σ_{ck} будет расти, а значит, глубина резания-скалывания h снижаться.

Как следует из формулы, повышение переднего отрицательного угла γ_n приводит к снижению глубины резания-скалывания породы. Повышение угла поворота реза φ_p приводит к повышению глубины резания-скалывания h , так как снижается сопротивление резанию-скалыванию породы из-за уменьшения ширины борозды разрушения. Увеличение диаметра реза d снижает глубину резания-скалывания породы h .

Полученная зависимость расчета глубины резания-скалывания может успешно использоваться при проектировании буровых долот с резами PDC. Например, на основе исследования закономерностей влияния скорости перемещения реза при резании-скалывании породы на глубину его внедрения и зависимости угла наклона траектории линейного перемещения реза от места (радиуса) его размещения в лопасти долота можно с учетом полученной аналитической зависимости определить рациональную схему установки резов на торце долота.

При проектировании долота следует учитывать такие важные обстоятельства, как тип горной породы и планируемый режим частоты вращения, для которого проектируется долото. В качестве важного параметра, характеризующего буримость горных пород, следует определить сопротивление горной породы резанию-скалыванию при различных значениях скорости протекания процесса ее разрушения. С целью оценки повышения сопротивления горной породы резанию-скалыванию

может использоваться методика оценки динамической твердости горных пород, предложенная в работе [2].

Для мягких горных пород и пород средней твердости увеличение данного параметра может быть очень значительным. В работе [3] исследовано влияние линейной скорости перемещения реза бурового инструмента на процесс разрушения горной породы при неизменной глубине внедрения h , в результате которого выявлен рост сопротивления горной породы разрушению – усилие резания выросло в 5 раз при повышении скорости резания-скалывания в пределах 0,05...2,35 м/с (рис. 5).

Результаты указанных экспериментов находятся в соответствии с известными положениями кинетической теории разрушения твердых тел [4]. С понижением начального энергетического барьера U_0 у разрушаемой горной породы до уровня энергии активации U_σ за счет увеличения действующих сил резания в соответствии с теорией снижается время, необходимое для завершения вероятностного процесса появления нарушений и разрушения связей между частицами горной породы τ_p .

Эксперименты показали, что проявляется жесткая количественная взаимосвязь в динамической системе: величина внешней разрушающей нагрузки – время распространения процесса разрушения конкретной горной породы (скорость перемещения разрушающего элемента вдоль плоскости резания) для конкретных условий динамического процесса резания горных пород инструментами режущее-скалывающего действия при неизменных значениях глубины внедрения h (резания-скалывания) и температуре процесса T .

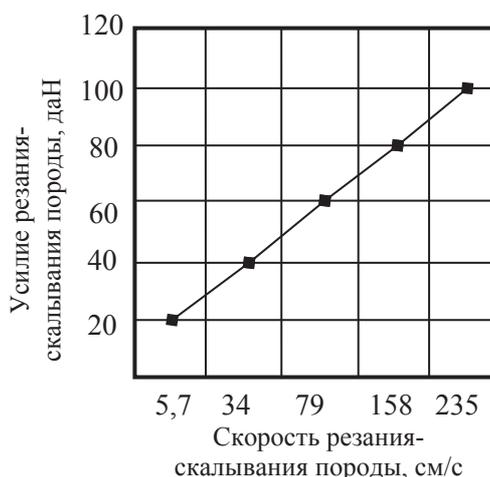


Рис. 5. Экспериментальная зависимость усилия резания-скалывания породы от скорости резания-скалывания

Как следует из приведенного на рис. 5 графика, при скоростях развития процесса резания-скалывания горной породы от 0 до 3 м/с, характерных для современных технологий бурения скважин, влияние фактора упрочнения горной породы на процесс разрушения вполне достаточно, чтобы су-

шественным образом отразиться на результативности процесса бурения. Такие скорости развития процесса разрушения горной породы могут формироваться в процессе ударного бурения скважин, бурении долотами PDC и высокооборотном вращательном бурении алмазным буровым инструментом, в том числе при бурении гидравлическими забойными двигателями.

В литературе приводятся и другие интересные результаты экспериментальных исследований по изучению характеристик динамического процесса разрушения горных пород. Так, В.П. Рожковым [5] проведен эксперимент по вдавливанию конуса Роквелла (угол приострения 120°) в горные породы с различной интенсивностью осевого нагружения v_n от 15 до 60 Н/с.

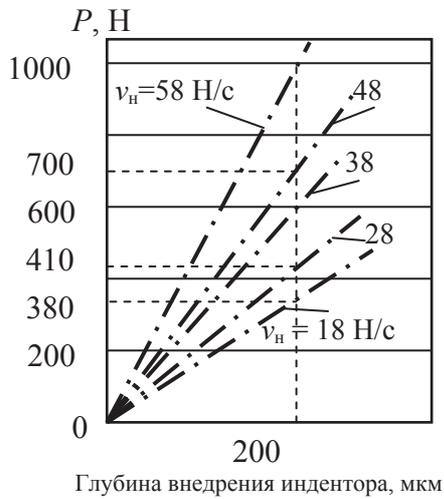


Рис. 6. Экспериментальные зависимости глубины внедрения индентора от скорости нагружения v_n .

На рис. 6 приведены экспериментальные зависимости глубины внедрения индентора от усилия при различных скоростях его нагружения.

По результатам экспериментальных работ установлено, что для внедрения на определенную глубину в породу требуется значительно меньшее усилие, если скорость нагружения индентора будет ниже. При этом для внедрения, например, на глубину 200 мкм, независимо от скорости приложения усилия, время до достижения заданной глубины оказалось примерно равным и составило 15–18 с. В то же время изменение скорости приложения усилия приводит к изменению микротвердости породы. Например, микротвердость мрамора при росте интенсивности нагружения от 15 до 60 Н/с возросла от 1 до 4,5 кН/мм. Для более твердых горных пород показатель роста микротвердости при повышении скорости нагружения оказался еще выше.

Очень важным является рассмотрение и другого аспекта «скоростного упрочнения» разрушаемых горных пород. К примеру, скорость перемещения резца долота может определяться из зависимости $v_n = \pi D \omega$, где D — диаметр окружности, на которой размещается конкретный резец в лопасти

долота (или диаметр долота), м; ω — частота вращения долота, c^{-1} .

В этом случае, если линейная скорость в центральной точке торца долота равна нулю, то для долота диаметром 190,5 мм (0,1905 м) при частоте вращения долота 300 мин^{-1} (5 с^{-1}) линейная скорость резца, размещенного на внешнем радиусе торца долота, будет равна 3 м/с. Если диаметр равен долота 250,8 мм, то при том же значении частоты вращения линейная скорость будет равна около 4 м/с. При частоте вращения 10 с^{-1} , характерной для работы турбобура, линейная скорость резцов на кромке долота диаметром 190,5 мм составит около 6 м/с.

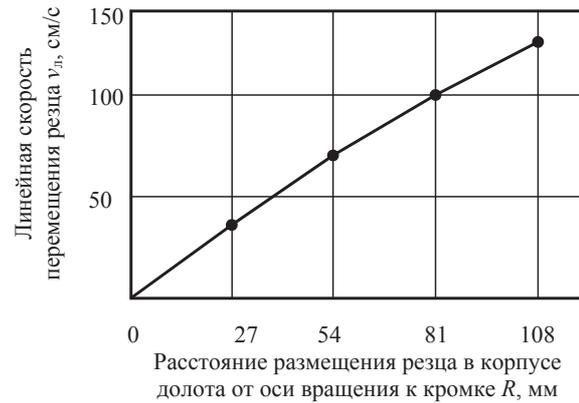


Рис. 7. Зависимость линейной скорости перемещения резца v_n от расстояния его размещения от оси вращения долота R (для частоты вращения долота 120 об/мин)

На рис. 7 представлен график распределения скоростей перемещения резцов PDC, размещенных вдоль лопасти долота при оборотах, характерных для низкооборотных забойных двигателей.

В результате такого распределения скоростей резания-скалывания резцы долота, размещенные ближе к наружному диаметру, должны вследствие роста $\sigma_{ск}$ испытывать повышенное сопротивление резанию-скалыванию, в сравнении с резцами, размещенными ближе к центру торца долота.

Для решения задачи выравнивания условий резания-скалывания породы, при которых все резцы на торце долота будут работать в равных условиях, испытывая равное сопротивление резанию-скалыванию, можно использовать при расстановке резцов следующие общие технические предложения, которые следуют из формулы для расчета глубины резания-скалывания породы резцом h .

1. Отрицательный передний угол установки резцов γ_n должен быть оптимальным для конкретного типа горных пород на наружной кромке торца долота и увеличиваться до максимально возможного ($15...20^\circ$) при установке резцов ближе к центру долота.

При этом важны следующие рекомендации. Передний отрицательный угол γ_n не должен снижаться до нулевого значения и тем более переходить в область положительных значений, так как это может привести к контакту задней грани с ди-

намической плоскостью резания-скалывания и отрицательно сказаться на стойкости резцов, особенно при бурении твердых, трещиноватых горных пород, горных пород с включением более твердых обломков, конгломератов и брекчий вследствие динамического характера разрушения породы.

Для определения конкретной величины переднего угла резца, размещенного на лопасти долота на некотором расстоянии от периферийного, необходимо использовать выражение:

$$\gamma_{ni} = \gamma_{n(i-1)} R_i / R_n,$$

где γ_{ni} и $\gamma_{n(i-1)}$ – абсолютные значения передних углов, а R_i и R_n – радиусы размещения искомого и периферийного резцов в корпусе долота соответственно.

2. Диаметр резцов должен уменьшаться (при равной величине выпуска резцов) в направлении от центра торца к его периферии. Целесообразно использование критерия «формирования и поддержания одинаковых контактных давлений на всех сегментах размещения резцов в корпусе долота» за счет варьирования размерами резцов. Иными словами, для приведения текущих контактных давлений для резцов различных сегментов корпуса долота к одинаковым значениям необходимо использовать пластины размерного ряда обратно пропорционального величине действующих «реактивных» динамических нагрузок, возникающих со стороны разрушаемой горной породы.

Площадь контакта с горной породой PDC резцов лопасти долота текущего внутреннего ряда S_i , исходя из критерия «постоянства контактных давлений», находится по формуле:

$$S_i = S_{i-1} \frac{F_i}{F_{(i-1)}},$$

где $F_{(i-1)}$, F_i – реактивная сила, действующая со стороны горной породы соответственно на предыдущий внешний и i -й текущий внутренний резцы; S_{i-1} – площадь контакта с породой предыдущего внешнего резца долота.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нескоромных В.В. Разрушение горных пород при проведении геологоразведочных работ. – Красноярск: СФУ, 2012. – 300 с.
2. Борисов К.И. Научная база нового метода оценки эффективности процессов разрушения горных пород современными инструментами режуще-скалывающего действия // Вестник ЦКР Роснедра. – 2011. – № 4. – С. 51–58.
3. Борисов К.И. Научный метод оценки эффективности динамических процессов разрушения горных пород при бурении скважин современными инструментами режуще-скалывающего действия: дис. ... д-ра техн. наук. – Томск, 2012. – 181 с.

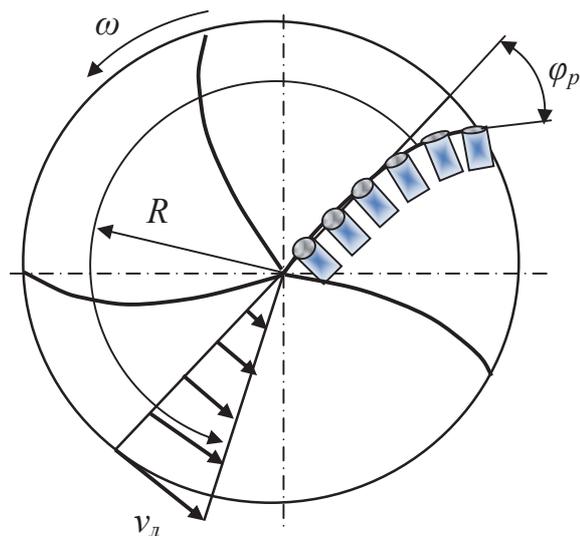


Рис. 8. Схема установки резцов на торце долота с учетом скоростей резания-скалывания породы

Кстати, площадь контакта PDC резца с горной породой S_i в соответствии с формулой для расчета h зависит от величины переднего угла γ_n .

Расчет значений реактивных сил, действующих на резцы, располагаемые на различных радиусах лопасти долота, можно проводить по формуле рис. 7 [2]:

$$F_{xi} = F_{x0} + kv_{л},$$

где F_{x0} – значение реактивной силы при скоростях перемещения режущего элемента, близких к нулю; $v_{л}$ – линейная скорость перемещения резца вдоль плоскости резания; K – эмпирический коэффициент.

3. Угол поворота резца ϕ_p может изменяться в пределах $0...10^\circ$ и увеличиваться в направлении от центра к периферии торца (рис. 8).

Результаты выполненных исследований могут успешно использоваться специалистами, занимающимися вопросами разработки конструкций и оптимизацией размещения вооружения долот типа PDC, имеющих широкое коммерческое применение при бурении как геологоразведочных, так и эксплуатационных скважин на нефть и газ.

4. Нейштетер И.А. Кинетическая природа статического и динамического разрушения горных пород // Межвузовский научный тематический сборник «Совершенствование техники и технологии бурения скважин на твердые полезные ископаемые». Вып. 21. – Екатеринбург: Уральская государственная горно-геологическая академия, 1998. – С. 53–67.
5. Рожков В.П. Разработка теоретических основ и совершенствование бурения геологоразведочных скважин алмазным породоразрушающим инструментом: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Томск, 1999. – 32 с.

Поступила 11.02.2013 г.