

УДК 622.24.051.64

Методика управления процессом бурения и экспериментальные исследования сил сопротивления при бурении долотами с резцами PDC

В.В.НЕСКОРОМНЫХ¹, М.С.ПОПОВА¹, А.Е.ГОЛОВЧЕНКО¹, П.Г.ПЕТЕНЁВ¹, ЛИУ БАОЧАНГ²

¹ Институт горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета, Красноярск, Россия

² Университет Цзилинъ, Чанчунь, Китай

Как цитировать эту статью: Методика управления процессом бурения и экспериментальные исследования сил сопротивления при бурении долотами с резцами PDC / В.В.Нескоромных, М.С.Попова, А.Е.Головченко, П.Г.Петенёв, Лиу Баочанг // Записки Горного института. 2020. Т. 245. С. 539-546. DOI: 10.31897/PMI.2020.5.5

Аннотация: Рациональная, теоретически обоснованная и эмпирически верифицированная система управления является условием оптимального управления процессом бурения с соблюдением критериев минимизации затрат временных и материальных ресурсов. Новое поколение породоразрушающего инструмента с применением резцов PDC (*polycrystalline diamante cutters*), крайне эффективных при бурении скважин различного целевого назначения в горных породах средней твердости, диктует необходимость разработки методики и критериев оптимального управления процессом бурения с использованием данного инструмента.

В работе представлен аналитический анализ силового взаимодействия породоразрушающих элементов, горной породы, вмещающей забой, и бурового раствора, насыщенного шламом, выделены влияющие факторы, приведены зависимости для определения параметров разрушения горных пород. Эмпирическая верификация теоретических положений проведена на основе анализа данных экспериментального бурения мрамора коронкой с резцами PDC диаметром 76,2 мм, обработанных с применением метода полного факторного эксперимента с получением математических моделей факторов и их графической интерпретации.

Рассмотрена методика управления процессом бурения, основанная на оптимальном соотношении частоты вращения инструмента, осевой нагрузки и углубления за один оборот, позволяющая определить по косвенным признакам режим разрушения горной породы на забое скважины и выбрать оптимальные значения параметров режима бурения, которые соответствуют наиболее оптимальным условиям с точки зрения достижения максимальной механической скорости бурения в совокупности с рациональным режимом работы породоразрушающего инструмента. Представлена схема, содержащая возможные варианты отработки долота и способы их распознавания по соотношению углубления за один оборот и частоты вращения породоразрушающего инструмента.

Ключевые слова: алмазное бурение; полный факторный эксперимент; управление процессом бурения; отработка бурового инструмента; резцы PDC; режимы бурения

Введение. Применение резцов PDC в качестве породоразрушающих элементов для изготовления коронок и долот – один из прогрессивнейших трендов при изготовлении породоразрушающего инструмента для разрушения горных пород [2, 8-14]. Инструмент такого типа способен обеспечить высокие скорости бурения скважин различного целевого назначения в горных породах широкого спектра твердости в совокупности с большим ресурсом. Однако вопрос силового анализа взаимодействия породоразрушающих элементов, горной породы, вмещающей забой, и бурового раствора, насыщенного шламом, нельзя назвать досконально изученным.

Силы сопротивления при бурении долотами с резцами типа PDC существенно влияют на процесс разрушения, его эффективность и, в частности, стойкость самих резцов [7]. Исследования, представленные в работе [5], а также аналитические данные компании Smith Bits [15] показывают, что наиболее интенсивный износ резцов возможен в точке на расстоянии 0,8 радиуса долота r , что указывает на основное влияние на изнашивание резцов сил сопротивления работе резцов, величина которых определяется значением линейной скорости перемещения резцов, которая увеличивается от центра торца к его периферии в соответствии с зависимостью $2\pi\omega r$, где ω – частота вращения долота. Вопросу влияния скорости перемещения резца в процессе резания-скалывания породы на процесс разрушения горной породы посвящены исследования К.И.Борисова [1].

Известна зависимость из работы [1], показывающая связь коэффициента сопротивления разрушению горной породы от величины осевого усилия на резец, полученная в ходе экспериментальных исследований на стенде. Из зависимости следует, что коэффициент сопротивления активно возрастает на этапе упругого деформирования горной породы, снижаясь в момент, когда

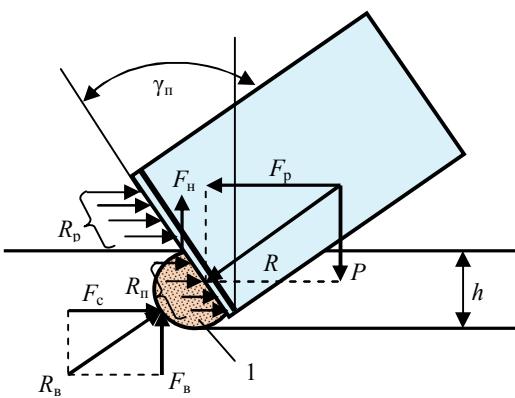


Рис.1. Схема для анализа процесса резания – скальвания горной породы резцом PDC
1 – ядро сжатия горной породы

породы, так и сопротивление среды (бурового раствора) при бурении долотами с резцами PDC. Для уточнения действующих сил и реакций обратимся к схеме (рис.1).

Сила, выталкивающая резец с отрицательным передним углом в процессе резания – скальвания горной породы, может определяться по формуле

$$R_b = \sigma_{ck} S_{ck} K, \quad (1)$$

где σ_{ck} – предел прочности на скальвание горной породы, Па; S_{ck} – площадь скальваемой резцом породы на передней грани, м^2 ; K – коэффициент, учитывающий превышение усилие сопротивления горной породы резанию-скальванию при повышении линейной скорости резца.

Размер площадки скальвания породы S_{ck} определен в работе [3]:

$$S_{ck} = 0,5\sqrt{dh} \frac{h}{\sin \gamma_{ck}}, \quad (2)$$

где d – диаметр резца, м; h – глубина внедрения резца в породу, м; γ_{ck} – угол скальвания породы на передней грани резца, град.

В завершенном виде формула (1) будет выглядеть следующим образом:

$$R_b = \frac{\sigma_{ck} K \pi h^2 \sqrt{d}}{2 \sin \gamma_{ck}}. \quad (3)$$

Сопротивление среды можно рассчитать по формуле, в которой учитывается, прежде всего, скорость перемещения резца и плотность среды:

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

где ρ_c – весовая плотность среды с учетом плотности бурового раствора, насыщенного шламом из зоны разрушения и разрушающей горной породы, Н/м^3 ; S – площадь резца или его проекции на линию резания, если угол резания ϕ_p не равен нулю, а составляет угол более 0 градусов (обычно не более 5-10°); C_c – коэффициент сопротивления со стороны резца, определяемый формой его плоскости (ориентировочно для плоского 1, для круглого выпуклого 0,5, для вогнутого по дуге окружности 1,5).

Таким образом, суммарная сила сопротивления движущемуся по забою резцу равна сумме R_b и R_c .

Из представленной схемы (рис.1) следует, что реакция еще не разрушенной горной породы R_b воздействует на ядро сжатия (уплотнения) 1, так как в ядре сжатия она разрушена до состояния мелкого дробления. Реакция R_b в случае установившегося режима резания – скальвания породы направлена навстречу результирующему вектору осевого усилия и усилия резания – скальвания R и под прямым углом к поверхности резца.

напряжения в горной породе вызывают активное объемное разрушение и необратимое пластическое деформирование (образование трещин, активное разрушение), чему свидетельствуют значения угла α , полученные в интервале малых (зона упругого деформирования) и более значительных (зона пластического деформирования) значений осевого усилия. При этом следует отметить, что кривая, представленная в данной работе, не учитывает сопротивления среды, а именно бурового раствора, насыщенного шламом, и сопротивления уже разрушенной перед резцом горной породы, но еще не удаленной с забоя скважины.

Методология исследования. Рассмотрим теоретические положения, позволяющие учесть сопротивление как уже разрушенной перед резцом горной по-

Сила, которая направлена навстречу осевому усилию, компенсируя силу сопротивления $R_{\text{в}}$, будет равна

$$F_{\text{в}} = R_{\text{в}} \sin \gamma_{\text{n}}, \quad (5)$$

где γ_{n} – передний угол резца, град.

Сопротивление среды обуславливает появление реакции $F_{\text{н}}$, направленной навстречу осевому усилию и производящей эффект выталкивания резца из горной породы при вращении долота и разрушении горных пород. Эту реакцию можно определить из зависимости

$$F_{\text{н}} = 0,5v_p^2 \rho_c S C_c \sin \gamma_{\text{n}} \cos \gamma_{\text{n}}. \quad (6)$$

Для определения коэффициента K в формулах (1) и (3) следует использовать результаты экспериментальных исследований по определению возрастающей силы сопротивления резанию – скальванию породы при росте линейной скорости резца, представленные в работе [3], где приведены зависимости, отражающие влияние скорости резания – скальвания породы v_p на величину усилия $R_{\text{в}}$ для песчаника.

Из формулы (3) следует, что усилие $R_{\text{в}}$ при установившемся режиме резания – скальвания породы, когда все основные параметры, входящие в формулу, остаются неизменными, изменение скорости перемещения резца будет зависеть от значения напряжения породы на скальвание $\sigma_{\text{ск}}$. Параметр прочности горной породы $\sigma_{\text{ск}}$ при повышении скорости резания – скальвания v_p будет также возрастать. В этом случае коэффициент K , представленный в формуле (3), будет равен

$$K = \frac{R_{\text{вт}}}{R_{\text{вн}}}, \quad (7)$$

где $R_{\text{вт}}$ – усилие сопротивления, соответствующее значению линейной скорости резца; $R_{\text{вн}}$ – усилие сопротивления, соответствующее линейной скорости, близкой к нулевому значению.

Усилие $R_{\text{вт}}$ возможно определить из зависимости

$$R_{\text{вт}} = \operatorname{tg} \theta x r, \quad (8)$$

где θ – угол наклона опытной кривой, которую можно получить при испытании предела прочности на скальвание определенной горной породы; x – текущее относительное значение расстояния от центра торца долота до точки, в которой происходит определение $R_{\text{в}}$; r – радиус долота.

Таким образом, для успешной оценки параметра K достаточно иметь экспериментально определенную зависимость сопротивления резания – скальвания, а именно угол β , полученный с линии роста параметра $R_{\text{в}}$.

Обсуждение. Для эмпирической оценки полученных значений расчета сопротивлений рассмотрим данные экспериментального бурения мрамора коронкой с резцами PDC диаметром 76,2 мм.

В результате бурения по плану полного факторного эксперимента с двумя влияющими факторами (осевая нагрузка и частота вращения) [4] получены следующие модели, отражающие процесс бурения с различных позиций, учитывающих как темп проходки и ресурс инструмента, так и величину углубления за один оборот – важнейший параметр управления бурением,

$$v_m = 5,84 + 4,53 P_{\text{oc}} + 3,15 \omega + 2,4 P_{\text{oc}} \omega, \quad (9)$$

$$h_{\text{об}} = 0,82 + 0,63 P_{\text{oc}} - 0,07 \omega - 0,05 P_{\text{oc}} \omega, \quad (10)$$

$$N = 10,04 + 8,38 P_{\text{oc}} + 3,66 \omega + 2,53 P_{\text{oc}} \omega, \quad (11)$$

$$N/v_m = 1,8 + 0,3 P_{\text{oc}} - 0,23 \omega - 0,306 P_{\text{oc}} \omega. \quad (12)$$

На рис.2 показана графическая интерпретация моделей механической скорости бурения (9) в пределах использованных при проведении эксперимента осевой нагрузки P и частоты вращения ω .

На рис.3 показана графическая интерпретация модели углубления за один оборот (10). Рациональная область управления режимами бурения, выявленная с помощью анализа энергоемкости (модель (12)), показывает, что эффективным будет углубление на уровне 1,3-1,4 мм/об, что обеспечит практически самую высокую, в условиях опыта, механическую скорость бурения.

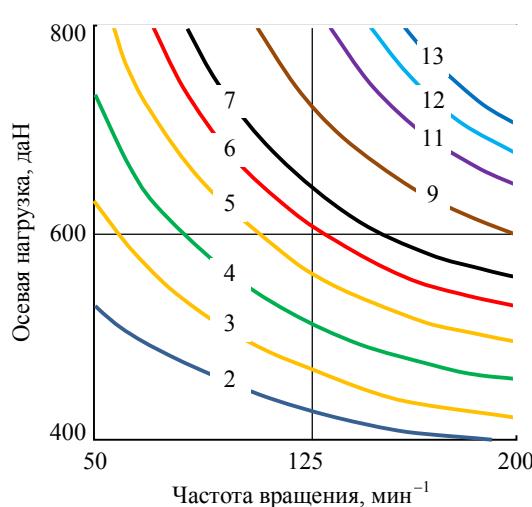


Рис.2. Графическая интерпретация модели механической скорости бурения буровой коронки с шестью резцами PDC диаметром 10 мм при бурении мрамора

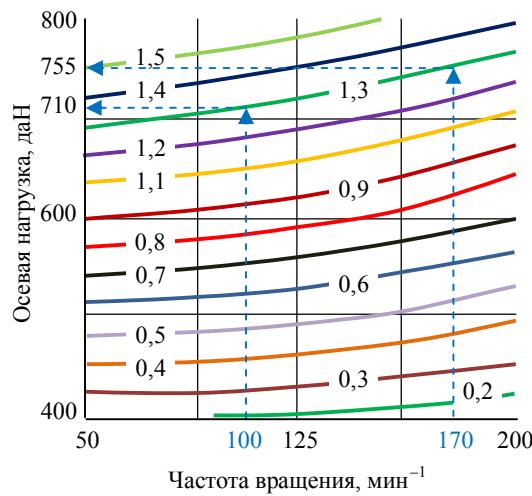


Рис.3. Графическая интерпретация модели углубления $h_{об}$ за один оборот инструмента на забое буровой коронки с шестью резцами PDC диаметром 10 мм при бурении мрамора

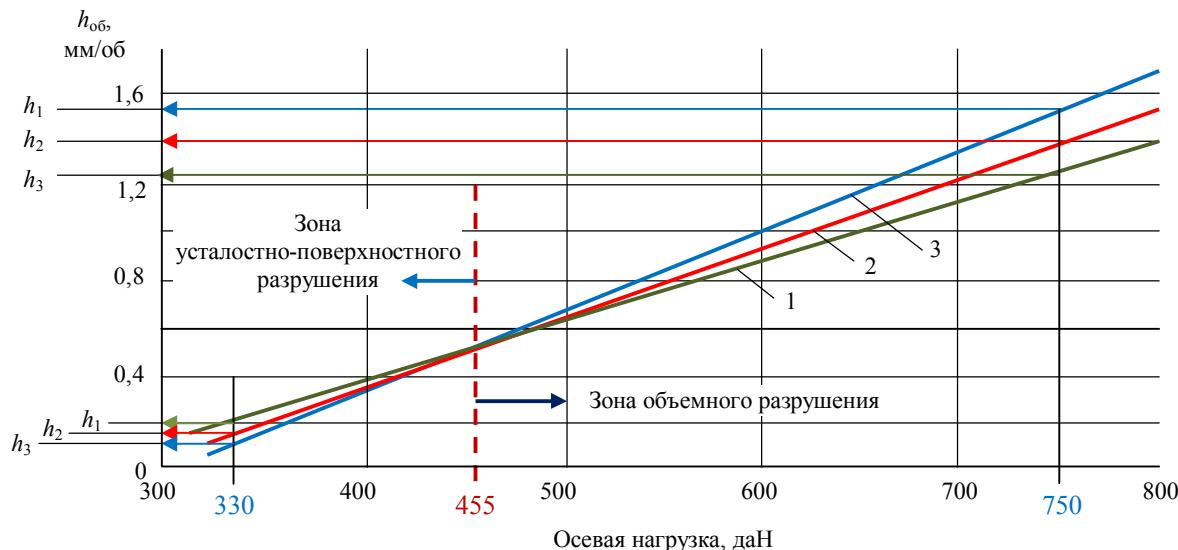


Рис.4. Зависимость углубления за один оборот от осевой нагрузки при различных значениях частоты вращения бурового инструмента

1 – максимальная частота вращения 200 мин⁻¹; 2 – средняя частота вращения 125 мин⁻¹; 3 – минимальная частота вращения 50 мин⁻¹

Обработка полученных данных, в частности графиков механической скорости бурения, позволяет получить графические зависимости углубления за один оборот от величины осевого усилия (рис.3) и частоты вращения (рис.4).

Зависимости на рис.4 получены по графикам механической скорости бурения (см. рис.2) при минимальной, средней и максимальной частоте вращения по зависимости $h_{об} = v_m/\omega$ в соответствии с методикой из работы [4]. Представленные на рис.4 графические зависимости свидетельствуют о повышении осевой нагрузки при повышении величины углубления за один оборот, при этом линии углубления за один оборот имеют перекреcывание при $P_{oc} = 455$ дан. Осевое усилие данной величины разделяет процесс разрушения на усталостно-поверхностный режим (до величины 455 дан) и объемное разрушение (после величины 455 дан).

Режим разрушения меняет и зависимость углубления за один оборот от частоты вращения:

– при усталостно-поверхностном разрушении, когда величины осевого усилия (напряжений в горной породе) недостаточно для объемного разрушения, максимальное углубление h_1 наблюдается

при максимальном значении частоты вращения (200 мин^{-1}), а минимальное углубление h_3 при минимальной частоте вращения (50 мин^{-1});

– при объемном разрушении ситуация меняется на противоположную, т.е. максимальная величина углубления h_1 соответствует наименьшему значению частоты вращения (50 мин^{-1}), а минимальное углубление h_3 максимальной частоте вращения (200 мин^{-1}).

На рис.5 представлены графики, показывающие зависимость величины углубления за один оборот от частоты вращения бурowego инструмента. Представленные данные показывают повышение углубления за один оборот при усталостно-поверхностном разрушении (линия 1 на рис.5) по мере роста частоты вращения бурового инструмента. В то же время при объемном разрушении, напротив, наблюдается снижение углубления за один оборот по мере повышения частоты вращения (линии 2, 3, 4 на рис.5), что указывает на рост сопротивлений со стороны горной породы и среды по мере роста линейной скорости резания – скальвания. При этом темп снижения глубины резания – скальвания горной породы повышается при повышении осевого усилия и соответственно глубины внедрения резцов в горную породу.

Темп снижения углубления за один оборот, выраженный через угол β , позволяет определить коэффициент сопротивления как тангенс этого угла:

$$K = \operatorname{tg}\beta = \frac{\Delta h_{\text{об}}}{\Delta \omega}, \quad (13)$$

где Δh – величина снижения углубления за один оборот на интервале повышения частоты вращения $\Delta \omega$, например, от ω_1 до ω_2 (рис.5).

Представленные результаты обработки данных экспериментального бурения показывают, что полученные теоретические зависимости получили подтверждение, поскольку свидетельствуют, что по мере роста глубины внедрения резцов в породу h сопротивление в режиме объемного разрушения нарастает, а в режиме усталостно-поверхностного разрушения, наоборот снижается. Это связано с тем, что в режиме усталостно-поверхностного разрушения максимальное углубление за один оборот достигается при максимальной частоте вращения, что подтверждено многими экспериментальными данными [4, 6].

Результаты. Практическое применение полученных закономерностей может быть реализовано при диагностике режима разрушения горной породы при управлении процессом бурения с применением интерактивных систем, например, забойных телеметрических систем или управления процессом бурения с применением систем компьютерного сопровождения APS [4].

На рис.6 показана программа управления параметрами режима бурения. Например, на этапе I произошел рост частоты вращения от величины ω_1 до ω_2 при неизменной величине осевого усилия (500 дан). В этом случае происходит снижение величины углубления за один оборот вследствие роста сил сопротивлений со стороны разрушаемой породы и среды (формулы (3) и (4), что генерирует появление сил, снижающий величину осевого усилия (формулы (5) и (6)). В данном случае механическая скорость будет определяться произведением $v_m = h_1 \omega_2$. Поскольку произошло снижение величины углубления от h_o до h_1 , рост v_m будет незначительным или будет отсутствовать.

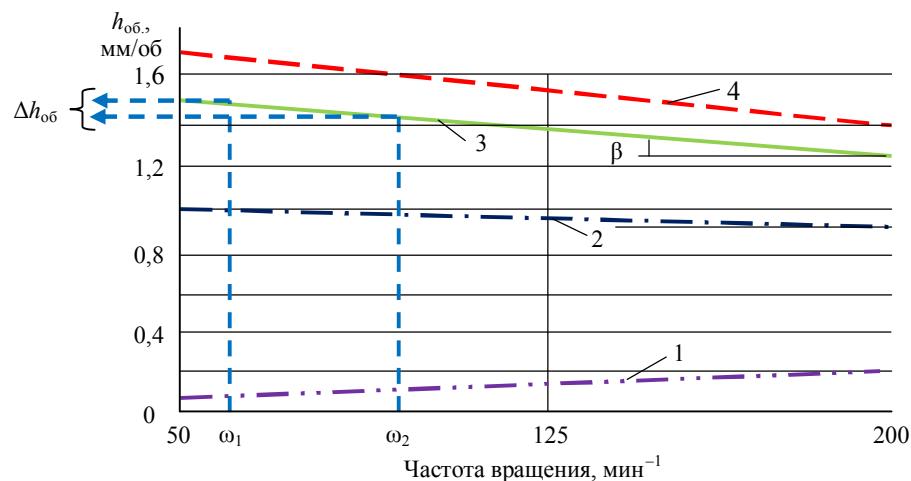


Рис.5. Зависимость углубления за один оборот от частоты вращения бурового инструмента
Осиевая нагрузка 330 дан (1); 600 дан (2); 750 дан (3); 800 дан (4)

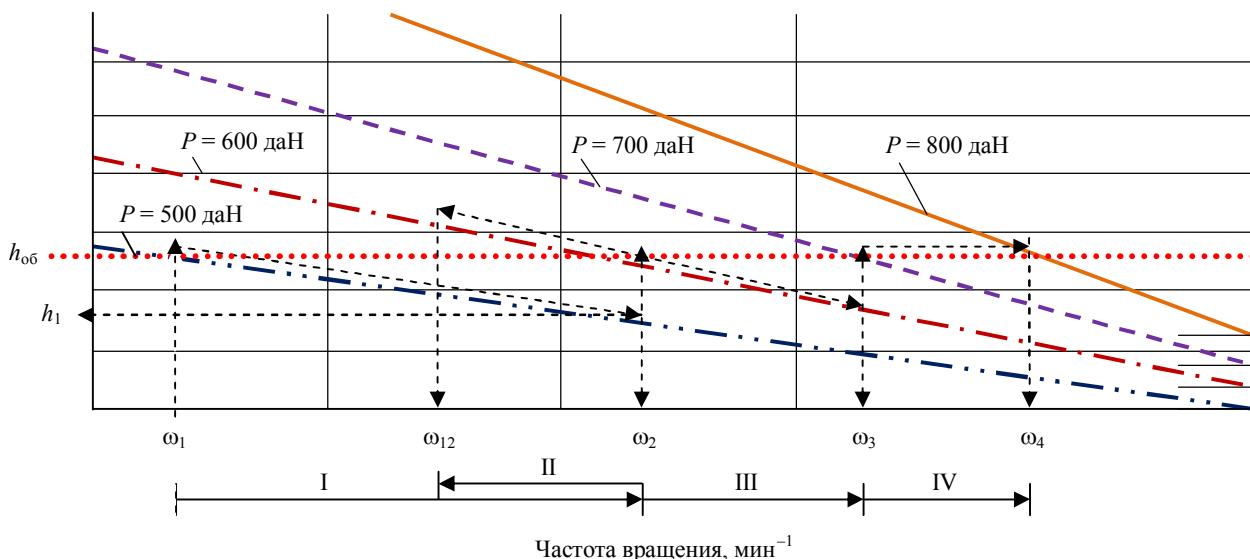


Рис.6. Схема программы управления параметрами режима бурения по заданной оптимальной величине углубления за один оборот $h_{об}$ при изменении частоты вращения бурового инструмента ω и различных значениях осевого усилия P

Для устранения данной проблемы можно перейти к реализации этапа II, который состоит в повышении осевой нагрузки до 600 даН и снижении частоты вращения до величины ω_{12} , что обеспечит более высокое значение механической скорости бурения в сравнении с этапом I при меньшем значении частоты вращения бурового инструмента.

Отработку бурового инструмента рационально производить по заданной величине углубления за один оборот, например, $h_{об}$ (рис.6). В этом случае корректировки частоты вращения, например, от ω_2 до ω_3 и ω_4 , потребуют изменения и осевого усилия, а именно, от величины осевой нагрузки 600 перейти к 700, а затем и 800 даН, что позволит планомерно повысить механическую скорость бурения по мере повышения частоты вращения.

Для определения наиболее оптимального соотношения между выбранной частотой вращения и осевой нагрузкой в режиме интерактивного управления процессом бурения могут быть применены эмпирические модели типа (10) и соответствующая графическая интерпретация модели (см. рис.3). Например, если заданной величиной при отработке долота является углубление за один оборот $h_{об}$, равное 1,3 мм (см. рис.3), то изменение частоты вращения от 100 до 170 мин⁻¹ потребует повышения осевой нагрузки от 710 до 755 даН, что позволит сохранить величину углубления 1,3 мм и повысить механическую скорость с 7,8 до 13,3 м/ч.

Подобные эмпирические модели, полученные в интерактивном режиме, и их интерпретация позволяют оперативно управлять режимами бурения в области, которая обеспечивает рациональную отработку долот.

При отработке бурового инструмента наиболее оптимальным является режим объемного разрушения горной породы. Тем не менее, в процессе проходки на длительном интервале, когда происходит смена горных пород разной степени буримости, наступает износ вооружения долот, меняется объем образующегося шлама и условия очистки забоя от выбуренной породы, количество подаваемого к забою очистного агента, режим бурения может меняться, отклоняясь от благоприятного объемного режима разрушения горных пород в область менее эффективного усталостно-поверхностного режима разрушения.

Например, в ходе износа долота или при смене мягкой горной породы более твердой, режим разрушения может стать усталостно-поверхностным. Возможен вариант защламования забоя при недостаточной промывке или напротив, может наступить момент, когда чрезмерная подача бурового раствора приведет в гидроподпору торцевой части долота, или случай перегрева вооружения долота и, как следствие, его активное термомеханическое разрушение.

Интерактивная поддержка отработки долота в каждом из перечисленных случаев, учитывая установленные зависимости между углублением за один оборот долота на забое и параметрами

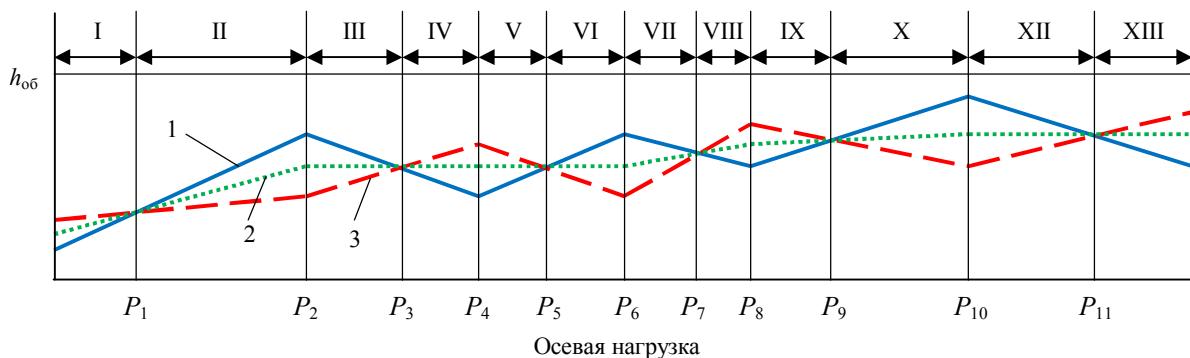


Рис.7. Схема изменения углубления за один оборот от осевой нагрузки и частоты вращения на этапах длительной отработки долота

1 – минимальная частота вращения при отработке долота; 2 – средняя частота вращения; 3 – максимальная частота вращения при отработке долота

режима бурения, позволяет проводить своевременную и оптимальную корректировку условий отработки долота.

На рис.7 представлена схема, содержащая возможные варианты режима отработки долота и способы их распознавания по соотношению углубления за один оборот и частоты вращения долота.

При отработке долота могут наступать с некоторым чередованием следующие режимы работы инструмента:

- I – усталостно-поверхностное разрушение;
- II – объемное разрушение;
- III – возврат к усталостно-поверхностному разрушению, может быть вызвано повышением твердости горной породы, зашламованием забоя, изнашиванием вооружения долота, гидроподпором долота потоком бурового раствора;
- IV – усталостно-поверхностное разрушение, может быть вызвано повышением твердости горной породы, зашламованием забоя, изнашиванием вооружения долота, гидроподпором долота потоком бурового раствора;
- V – возврат к объемному разрушению;
- VI – объемное разрушение на новом уровне осевой нагрузки;
- VII, VIII – повторение режимов III, IV;
- IX, X – возврат к объемному разрушению и объемное разрушение на новом уровне осевой нагрузки;
- XII, XIII – переход и режим термомеханического разрушения бурового инструмента при чрезмерной осевой нагрузке (во многом аналогичен режимам III, IV).

Заключение. Таким образом, принимая во внимание изложенные в работе теоретические положения и примеры практической апробации методики управления процессом бурения долотами с резцами PDC, с учетом сил сопротивления при бурении, возможно произвести автоматизацию процесса с применением предложенной методики по представленному алгоритму поиска оптимальных условий протекания процесса по трем основным критериям (частота вращения, осевая нагрузка и величина углубления за один оборот бурового инструмента) с учетом поступающей в режиме реального времени информации о протекании процесса.

Помимо управления процессом в оптимальном диапазоне значений характеристик процесса, используя методику отработки долот с применением эмпирических моделей интерактивного управления процессом бурения, можно распознавать забойные ситуации и управлять параметрами режима, как для выхода из неблагоприятных условий бурения, так и для выбора оптимальных параметров режима при отработке долот по заданной величине углубления за один оборот инструмента на забое скважины.

Представленная в статье методика управления процессом бурения может найти применение при бурении скважин как на твердые полезные ископаемые, так и на нефть и газ относительно

небольшой протяженности (до 1000-1500 м), ввиду того, что при более значительных величинах глубины буримых скважин нарастает влияние на процесс управления деструктивных факторов, таких как повышающееся горное давление, оказывающее влияние на физико-механические свойства буримых горных пород. Большая протяженность бурильной колонны в совокупности с возможной сложностью профиля скважины приводит к увеличению потерь мощности на трение колонны и возникновению колебательных процессов, что негативно влияет на передачу осевой нагрузки и частоты вращения долоту от устья скважины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борисов К.И. Современные методы оценки сопротивления горных пород резанию-скалыванию при бурении долотами PDC. Томск: Из-во ТПУ, 2013. 166 с.
2. Литвиненко В.С. Обоснование выбора параметров режима бурения скважин роторными управляемыми системами / В.С.Литвиненко, М.В.Двойников // Записки Горного института. 2019. Т. 235. С. 24-29. DOI 10.31897/PMI.2019.1.24
3. Нескоромных В.В. Аналитическое исследование процесса резания-скалывания горной породы долотом с резцами PDC / В.В.Нескоромных, К.И.Борисов // Известия Томского политехнического университета. 2013. Т. 323. № 1. С. 191-195.
4. Нескоромных В.В. Оптимизация в геологоразведочном производстве. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2013. 246 с.
5. Нескоромных В.В. Применение материала нового поколения в качестве элементов современного породоразрушающего инструмента / В.В.Нескоромных, М.С.Попова, А.Е.Головченко // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2019. № 10. С. 15-20. DOI: 10.30713/0130-3872-2019-10-15-20
6. Нескоромных В.В. Методика оптимальных параметров режима и условий бурения скважин / В.В.Нескоромных, П.С.Пушмин // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАН. 2011. № 1 (38). С. 151-157.
7. Третьяк А.Я. Инновационные подходы к конструированию высокоэффективного породоразрушающего инструмента / А.Я.Третьяк, В.В.Попов, А.Н.Гросси, К.А.Борисов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 8. С. 225-230. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-8-0-225-230
8. Brook B. Principles of diamond tool technology for sawing rock // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2002. Vol. 39. Iss. 1. P. 41-58. DOI: 10.1016/S1365-1609(02)00007-2
9. Hasan A.R. Wellbore heat-transfer modeling and applications / A.R.Hasan, S.Kabir // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2012. Vol. 86-87. P. 127-136. DOI: 10.1016/S.petrol.2012.03.021
10. Huang H. Discrete element modeling of tool-rock interaction I: Rock cutting / H.Huang, B.Lecampion, E.Detournay // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 2013. Vol. 37. Iss. 13. P. 1913-1929. DOI: 10.1002/nag.2113
11. Integrated FEA modeling offers system approach to drillstring optimization / H.Aslaksen, M.Annand, R.Duncan, A.Fjaere, L.Paez, U.Tran // Society of Petroleum Engineers / SPE Drilling Conference. 2006. 21-23 February. Miami, Florida, USA. P. 669-684. DOI: 10.2118/99018-MS
12. Litvinenko V.S. (ed). XVIII International Coal Preparation Congress: Saint-Petersburg, Russia, 28 June – 01 July 2016. Springer International Publishing, 2016. Vol. 1. 1196 p. DOI: 10.1007/978-3-319-40943-6
13. Optimization model for polycrystalline diamond compact bits based on reverse design / Z.Ai, Y.Han, Y.Kuang, Y.Wang, M.Zhang // Advances in Mechanical Engineering. 2018. Vol. 10. Iss. 6. DOI: 10.1177/1687814018781494
14. Production of coarse-grained high-strength microgrits to be used in drilling tools / O.A.Zanevskii, S.A.Ivakhnenco, G.D.Ilnitskaya, A.P.Zakora, R.K.Bogdanov, A.A.Karakozov, M.C.Popova // Journal of Superhard Materials. 2015. Vol. 37. Iss. 2. P. 85-96. DOI: 10.3103/S1063457615020082
15. Product Catalog. Smith Bits. A Schlumberger Company. 17_BDT_310907 Copyright 2018 Schlumberger. All rights reserved. URL: https://www.slb.com/_/media/files/smith/catalogs/bits_catalog (дата обращения 10.04.2020).

Авторы: В.В.Нескоромных, д-р техн. наук, профессор, sovair@bk.ru (Институт горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета, Красноярск, Россия), М.С.Попова, канд. техн. наук, старший преподаватель, alleniram83@mail.ru (Институт горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета, Красноярск, Россия), А.Е.Головченко, ассистент, antong77@yandex.ru (Институт горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета, Красноярск, Россия), П.Г.Петенёв, канд. техн. наук, доцент, pavel-whait@mail.ru (Институт горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета, Красноярск, Россия), Лиу Баочанг, профессор, liubc@jlu.edu.cn (Университет Цзилинь, Чанчунь, Китай).

Статья поступила в редакцию 09.06.2020.

Статья принята к публикации 04.10.2020.