

Технология и техника геологоразведочных работ

УДК 622.24.051.001.5

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ БУРЕНИИ СКВАЖИН УПРОЧНЕННЫМ АЛМАЗНЫМ ПОРОДОРАЗРУШАЮЩИМ ИНСТРУМЕНТОМ

С.Я. Рябчиков

Томский политехнический университет
E-mail: kafedrabs@mail.ru

Исследовано влияние режимных параметров на механическую скорость бурения при проходке скважин упрочненным алмазным породоразрушающим инструментом. Установлено оптимальное сочетание осевой нагрузки на породоразрушающий инструмент и его частоты вращения, обеспечивающее максимальную скорость бурения. Разработана методика определения правочных коэффициентов для задания рациональных значений осевой нагрузки на упрочненный породоразрушающий инструмент.

Ключевые слова:

Бурение скважин, упрочнение бурового инструмента, механическая скорость, алмазная коронка.

Key words:

Well drilling, hardening drilling tool, rate of penetration, diamond bit.

Эффективность бурения скважин, особенно в крепких горных породах, в значительной степени определяется эксплуатационными показателями породоразрушающего инструмента (ПРИ) и рациональными технологическими режимами. Недостаточный ресурс ПРИ, отсутствие скоординированных режимных параметров ограничивают рост производительности и снижение стоимости буровых работ. Разработанные нами новые технологии объемного упрочнения ПРИ, основанные на криогенном воздействии или радиационном облучении, позволяют повысить ресурс твердосплавного и алмазного инструмента в 1,3...1,8 раза [1, 2]. Очевидно, что для одних и тех же геолого-технических условий рациональные режимы бурения скважин ПРИ, имеющим различную износостойкость, должны отличаться. При определении рациональных режимных параметров бурения упрочненным ПРИ использовались основные выводы и рекомендации, полученные нами в процессе теоретических и экспериментальных исследований влияния термического «удара» в области низких отрицательных температур и радиационного облучения малыми дозами гамма-квантов на эксплуатационные показатели твердосплавного и алмазного ПРИ [3]. При этом оценка рациональных технологических параметров процесса бурения осуществлялась по двум направлениям:

- по критерию максимальной рейсовой скорости с учетом геолого-технических условий и эксплуатационных показателей упрочненного ПРИ;
- путём поиска рациональных значений осевой нагрузки на упрочненный ПРИ и его частоты вращения, обеспечивающих максимальное значение механической скорости бурения скважин в конкретных горных породах.

Многие исследователи рекомендуют в качестве показателя для оптимизации процессов бурения максимум рейсовой скорости [4–6]. Реализация данного показателя за счет увеличения частоты вращения бурового снаряда до величин, когда он будет кардинально влиять на производительность работы, ограничен техническими возможностями (эксплуатационными показателями) как ПРИ, так и бурового оборудования. Кроме того известно, что сокращение затрат времени на какую-либо одну операцию, даже в несколько раз, не приводит к существенному повышению производительности. В работе [7] показано, в частности, что при 2...3 кратном увеличении механической скорости бурения производительность, при прочих равных условиях, будет увеличена не более чем на 30...40 %. Поэтому наиболее перспективной может считаться такая технология бурения, которая

обеспечивает повышение всех основных показателей: углубка за рейс, механическая скорость бурения, износостойкость ПРИ, снижение времени на вспомогательные операции и т. д. Наиболее значимыми из перечисленных показателей являются механическая скорость бурения и ресурс ПРИ. Первый показатель в значительной степени определяется режимными параметрами бурения (осевая нагрузка и частота вращения), второй — износостойкостью используемого ПРИ.

В современных алмазных коронках, как правило, алмазы монтируются заподлицо с торцом матрицы или выступают на незначительную величину (до 5...8 % от размера зерен). Поэтому в процессе работы зазор между матрицей и забоем практически отсутствует или имеет очень небольшую величину, что затрудняет обеспечение нормального температурного режима на торце коронки. Работа алмазов и материала матрицы при этом сопровождается интенсивным механическим, физико-механическим и химико-механическим износом. При работе в таких условиях к износостойкости алмазов и, особенно матрицы, предъявляются повышенные требования.

Износостойкость любого материала характеризуется работой, которую необходимо затрачивать на изнашивание единицы его объема [8]:

$$\sigma_w = \frac{A}{\Delta V}, \quad (1)$$

где σ_w — износостойкость, кДж/мм³; A — работа, затрачиваемая на изнашивание, кДж; ΔV — абсолютный объемный износ, мм³;

$$A = f_T N L, \quad (2)$$

$$\Delta V = S_H W, \quad (3)$$

где f_T — коэффициент трения; N — нормальная нагрузка, Н; L — путь трения, км; S_H — номинальная площадь контакта, мм²; W — износ изделия, мм.

Подставляя (2), (3) в (1), износостойкость можно определить следующим образом:

$$\sigma_w = \frac{A}{S_H W}. \quad (4)$$

Дальнейшие преобразования выражения (4), выполненные Н.В. Цыпиным [9], приводят его к следующему виду:

$$\sigma_w = \frac{f_T p_m}{W_u}, \quad (5)$$

где p_m — давление на номинальной площади контакта, МПа, $p_m = N/S_H$; W_u — интенсивность изнашивания, мм/км, $W_u = W/L$.

Как видно из выражения (5), интенсивность изнашивания и алмазов, и матрицы в процессе работы коронки на забое в значительной степени зависит от нагрузки на инструмент. Интенсивность изнашивания композиционного алмазосодержащего материала будет тем больше, чем больше осевая нагрузка.

В начальный период работы у коронок без заданного выпуска алмазов последние обнажаются по мере износа матрицы и требуют обязательной приработки. Коронки с заданным выпуском алмазов могут производительно работать без предварительной приработки. В дальнейшем интенсивность изнашивания матрицы должна быть строго скоординирована с интенсивностью износа алмазов. Оптимальным соотношением этих показателей может быть равенство, предложенное в работе [9]:

$$W_m / W_a = 1, \quad (6)$$

где W_m , W_a — интенсивность изнашивания матрицы и алмазов соответственно.

Поэтому режимные параметры процесса бурения после приработки коронки должны подбираться таким образом, чтобы интенсивность изнашивания и матрицы, и алмазов были бы примерно одинаковыми. Ранее нами было установлено, что криогенная обработка и облучение малыми дозами гамма-квантов алмазных коронок приводит к повышению прочностных характеристик матрицы и качества закрепления алмазов [1]. В этом случае соотношение (6) будет нарушено. Из-за увеличения износостойкости матрицы, при прочих равных условиях, обнажение алмазов будет недостаточным для эффективной работы по разрушению горной породы. Будет нарушен шламовый режим под торцом коронки, что, в свою очередь, приведет к непроизводительному износу алмазов. Для увеличения интенсивности изнашивания матрицы необходимо, в соответствии с уравнением (5), повысить осевую нагрузку по сравнению с принятыми нормами для данных геолого-технических условий. Повышение осевой нагрузки и некоторое снижение интенсивности промывки позволят компенсировать падение механической скорости бурения и непроизводительный расход алмазов.

В общем случае величина осевой нагрузки на коронку определяется прочностными характеристиками горных пород, величиной суммарной площади контактов объемных алмазов с забоем, а также прочностными характеристиками самого ПРИ. Выбор рациональной осевой нагрузки на алмазную коронку и частоты её вращения определяется геологическими, техническими и технологическими факторами. Значения указанных параметров при бурении горных пород даже одной категории могут изменяться в достаточно широком диапазоне. Поэтому для конкретных геолого-технических условий необходимо иметь большой объем статистического материала, собранного при хронометражных наблюдениях при бурении скважин. На рис. 1, в качестве примера, приведена зависимость механической скорости бурения упрочненными при криогенной обработке алмазными коронками 01А3Д40К40 от осевой нагрузки и частоты вращения (усредненная категория горных пород по буримости — 9,2). Аналогичные зависимости получены при бурении горных пород X и XI категорий. Для построения поверхности отклика механи-

ческой скорости бурения была разработана методика, детальное описание которой приведено в работе [10]. Данная методика позволяет решить обратную задачу: по максимальному значению механической скорости бурения определить рациональные значения осевой нагрузки и частоты вращения для конкретной категории горных пород, типа и диаметра ПРИ. Расчётные значения параметров режима бурения корректировались с учётом результатов исследований, выполненных в производственных условиях.

Поиск рациональных значений основных режимных параметров бурения скважин с использованием теоретических расчётов и большого объёма хронометражных наблюдений показал, что повышенные эксплуатационные показатели ПРИ могут

быть реализованы для увеличения производительности и за счёт осевой нагрузки G , и за счёт частоты вращения n . В каждом конкретном случае величина максимальной механической скорости бурения $v_{\text{мех}}$ является вершиной поверхности, называемой поверхностью отклика, которая строится в трёхмерном пространстве $(G, n, v_{\text{мех}})$ при оптимальном значении двух параметров G и n . Для удобства пользования поверхностью отклика представляется в виде топографического плана. В системе координат G и n отмечают точки с известными значениями $v_{\text{мех}}$ (среднее значение механической скорости бурения для каждой конкретной пары технологических параметров G, n). Точки равных механических скоростей соединяются изолиниями. В результате построения изолиний получа-

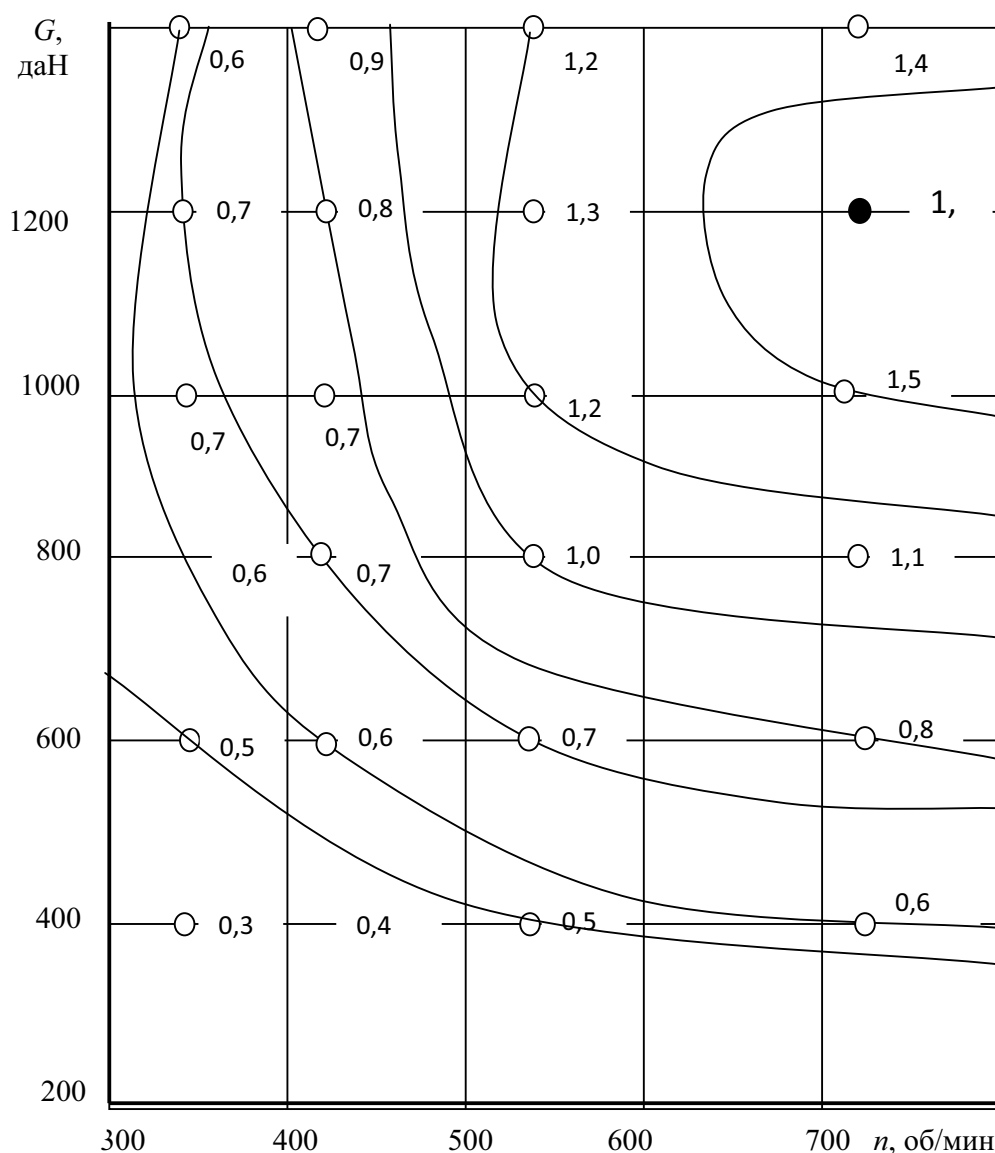


Рис. 1. Зависимость механической скорости бурения $v_{\text{мех}}$ от осевой нагрузки G и частоты вращения бурового снаряда n : алмазные коронки 01АЗД60К40, диаметр – 76 мм; усреднённая категория горных пород – 9,2; интенсивность промывки – 60..80 л/мин

ем поверхность отклика с вершиной в точке, имеющей максимальное значение механической скорости бурения. Вершиной поверхности отклика в данном случае является точка, имеющая значение 1,6 м/ч.

Поверхность отклика с вершиной, построенная по данным хронометражных наблюдений, обработанных с помощью методов математической статистики, позволяет с минимальной трудоёмкостью установить рациональную пару технологических параметров G и n для конкретных геолого-технических условий бурения скважин.

Результаты анализа аналогичных зависимостей для других горных пород могут быть использованы при разработке обобщённых технологических карт на бурение скважин на различных производственных объектах.

Выявленное оптимальное сочетание осевой нагрузки и частоты вращения (соответственно 1200 даН и 715 об/мин) обеспечивают наибольшую механическую скорость бурения (1,6 м/ч) не при максимальной осевой нагрузке в исследуемом диапазоне. Очевидно, что превышение критической величины осевой нагрузки (1200 даН) приводит к зашламованию торца коронки, препятствующему внедрению алмазов в горную породу. При этом снижается механическая скорость бурения, возрастает расход алмазов. Было установлено, что проходка на коронку при достижении критической осевой нагрузки вначале стабилизируется, а затем начинает снижаться. Для контрольных коронок стабилизация проходки на коронку начинается при меньших значениях осевой нагрузки, чем у упрочнённых коронок. Очевидно, что зашламование на забое приводит к чрезмерному обнажению алмазов и сокращению их работоспособного периода. В отличие от контрольных коронок, упрочнённые коронки, имея повышенную износостойкость матрицы и более надёжное закрепление алмазов, обеспечивают более высокие эксплуатационные показатели. Полученные результаты позволяют рекомендовать повышение режимного параметра «осевая нагрузка» при работе с алмазными коронками, прошедшими криогенную обработку, на 20...25 % по сравнению с контрольными (обычными) коронками.

Частота вращения бурового снаряда при бурении алмазными коронками в значительной степени определяет механическую скорость бурения. По данным Н.И. Корнилова [11] механическая скорость бурения при частоте до 1200 об/мин выражается уравнением прямой, проведенной из начала координат:

$$v = an, \quad (7)$$

где n — частота вращения коронки, об/мин; a — коэффициент, учитывающий физико-механические свойства горной породы, величину осевой нагрузки, конструктивные особенности алмазной коронки, может быть определен по формуле:

$$a = \frac{Pk_p k_a}{\pi p_w Dm},$$

тогда, подставив значение a в формулу (7), получим:

$$v = \frac{Pnk_p k_a}{\pi p_w Dm}, \quad (8)$$

где P — осевая нагрузка, даН; k_p — коэффициент разрушения горной породы; k_a — коэффициент, учитывающий форму алмазов; P_w — твёрдость породы по Шрейнеру, даН/мм²; D — диаметр алмазов, мм; m — число алмазов в коронке.

Угол наклона прямой к горизонтали (рис. 2), а, следовательно, интенсивность роста механической скорости бурения, в значительной степени определяются осевой нагрузкой и физико-механическими свойствами горной породы.

В работе И.С. Егорова [12] приведены результаты анализа и опытной проверки прогнозных формул с целью выявления математических выражений, наиболее близко описывающих изменение механической скорости в зависимости от условий бурения. В результате выполненной работы было установлено, что для прогнозирования механической скорости бурения алмазными коронками можно использовать формулу (8) при введении поправочного коэффициента. Поэтому при использовании данной формулы для прогнозирования механической скорости бурения упрочнёнными коронками необходимо ввести некоторые коррективы, учитывающие повышенную износостойкость и прочность матриц коронок, а также качество закрепления алмазных зёрен. Определение поправочного коэффициента h производилось по результатам исследований, приведенных на рис. 1 и 2.

На рис. 2 приведена зависимость механической скорости бурения коронками 01А3Д40К40 от частоты вращения бурового снаряда по породам с усреднённой категорией по буримости 9,2. Из рис. 2 видно, что механическая скорость бурения для коронок, прошедших криогенную обработку, на 15...20 % выше контрольных коронок.

В целом, при большом разбросе результатов испытаний (коэффициент вариации 28 %), зависимость механической скорости бурения от частоты вращения представляет собой также прямую, проведенную из начала координат. Полученный фактический материал позволяет определить значение коэффициента h . Для IX–XII категорий горных пород он изменяется в диапазоне 1,15...1,25. Поэтому формула (8) для определения механической скорости бурения в уточнённом виде запишется как:

$$v = \frac{Pnk_p k_a h}{\pi p_w Dm}.$$

Представленные результаты исследований были использованы при разработке технологических карт на бурение скважин в производственных организациях Восточного Казахстана при разведке полиметаллических месторождений.

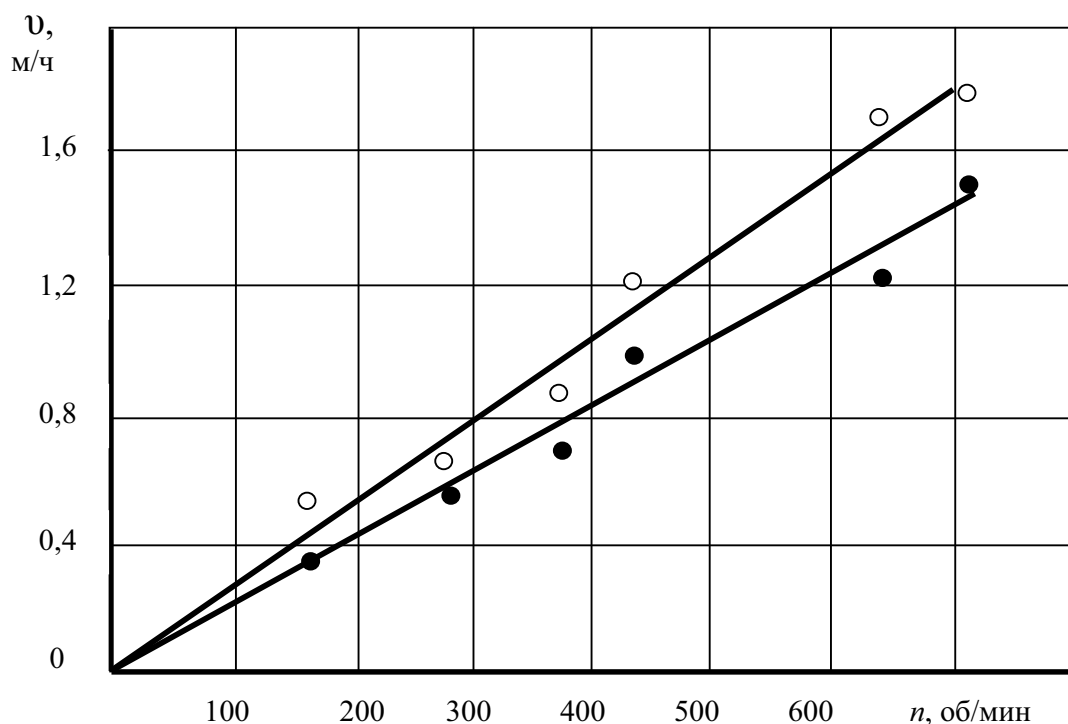


Рис. 2. Зависимость механической скорости бурения от частоты вращения коронки: коронка 01АЗД40К40, 76 мм; горная порода – порфирит, усреднённая категория – 9,2; ○ – упрочнённые коронки; ● – контрольные коронки

Выводы

1. Выявлены оптимальные значения режимных параметров бурения скважин породоразрушающим инструментом с повышенными эксплуатационными показателями. Определены методические подходы количественной оценки рационального сочетания осевой нагрузки и частоты вращения бурового снаряда для получения максимальной скорости бурения с использованием метода построения поверхности отклика в трехмерном пространстве.
2. Определены значения поправочных коэффициентов для оценки максимальной механической скорости бурения упрочненным алмазным породоразрушающим инструментом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рябчиков С.Я., Мамонтов А.П., Власюк В.И. Повышение работоспособности породоразрушающего инструмента методами криогенной обработки и радиационного облучения. – М.: Геоинформмарк, 2001. – 92 с.
2. Рябчиков С.Я., Власюк В.И., Спирин В.И. Объёмное упрочнение породоразрушающего и металлорежущего инструмента. – М.: Геоинформмарк, 2001. – 52 с.
3. Власюк В.И., Будюков Ю.Е., Рябчиков С.Я. Новые технологии в создании и использовании алмазного породоразрушающего инструмента. – М.: Геоинформмарк, 2006. – 140 с.
4. Сулакшин С.С. Разрушение горных пород при бурении скважин. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 129 с.
5. Бурение разведочных скважин / под ред. Н.В. Соловьёва. – М.: Высшая школа, 2007. – 904 с.
6. Козловский Е.А. Оптимизация процесса разведочного бурения. – М.: Недра, 1990. – 304 с.
7. Кардыш В.Г., Мурзаков Б.В., Окмянский А.С. Техника и технология бурения геологоразведочных скважин. – М.: Недра, 1989. – 256 с.
8. Кузнецов В.Д. Физика твердого тела: В 5-и т. – Томск: Полиграфиздат, 1963. – Т. 4. – 341 с.
9. Цыпин Н.В. Износостойкость композиционных алмазосодержащих материалов для бурового инструмента. – Киев: Наукова думка, 1990. – 191 с.
10. Рябчиков С.Я. Повышение износостойкости породоразрушающего инструмента различными физическими способами. – М.: МГП «Геоинформмарк», 1993. – 36 с.
11. Корнилов Н.И., Головин С.С. Современная тенденция в создании породоразрушающего инструмента // Новые технические средства для бурения геологоразведочных скважин: Сб. научн. трудов / под ред. Н.И. Исаева. – Л.: ВИТР, 1989. – С. 6–9.
12. Егоров И.С. Использование прогнозных формул механической скорости бурения в экспериментальных исследованиях // Разработка и совершенствование технологии алмазного бурения в сложных горно-геологических условиях: Сб. научн. трудов / под ред. В.С. Литвиненко. – М.: ВПО «Союзгеотехника», 1990. – С. 50–56.

Поступила 04.10.2010 г.