

нагрузки. Увеличение осевой нагрузки вызывает увеличение момента  $M_d$ , при этом величина частоты вращения долота уменьшается.

С другой стороны, для постоянного роста механической скорости бурения требуется постоянное увеличение всех параметров режима бурения. Соотношения между их величинами должно учитывать тип разрушаемой горной породы, свойства и состав бурового раствора (рис.6). С другой стороны, верхний предел возможной механической скорости задается уровнем технических возможностей силового привода и пределы возможной эксплуатации бурового оборудования (турбобур, долото).

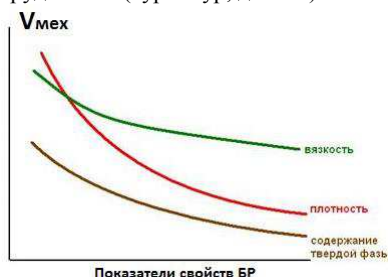


Рис. 6. Зависимость механической скорости бурения от изменения показателей свойств бурового раствора

Практика буровых работ показала, что невозможно заранее рассчитать абсолютно точно и установить величины параметров бурения для проходки одинаково эффективной проходки заданного интервала. Это обусловлено разнообразием условия проходки скважин и наличием множества переменных, от которых зависят показатели бурения. В процессе бурения приходится корректировать расчетные параметры в конкретных условиях. Корректировка параметров режима бурения зависит от способностей бурильщика и его квалификации, поэтому требует высоких временных издержек.

Для сведения к минимуму влияния человеческого фактора на процесс регулирования параметров режима бурения, а также для ускорения принятия решений, разработаны и используются устройства управления буровыми операциями с помощью электронных вычислительных машин. Исходные данные, необходимые для оценки, электронные вычислительные машины получают от датчиков и аппаратуры, размещенных в различных пунктах буровой установки. Полученная информация обрабатывается и ЭВМ выдает: оптимальное значение величины нагрузки на долото, прогноз проходки на долото до его износа, оптимальное значение частоты вращения долота, прогноз времени работы долота до его износа и другие рекомендации [1]. Но в основе данных ЭВМ заложены стандартные теоретические зависимости, которые не в полной мере учитывают взаимосвязь между параметрами режима бурения в разрушении, влияние категории буримости разрушаемой горной породы и технические возможности бурового оборудования. В связи с этим, проблема проектирования параметров режима бурения для конкретных горно-геологических и технико-технологических условий остается актуальной и в настоящее время.

#### Литература

1. Вадецкий Ю.В. Бурение нефтяных и газовых скважин // Издательский центр «Академия». — 2003. — 352 с.
2. Neftrossia.ru [Electronic resource]. Влияние частоты вращения долота. Влияние расхода бурового раствора. — URL: <http://neftrossia.ru/vlijanie-chastoty-vrashhenija-dolota/>. — (Usagedate: 14.02.2014).
3. Lib.rushkolnik.ru [Electronic resource]. Влияние режимных параметров на показатели бурения. — URL: <http://lib.rushkolnik.ru/text/22398/index-1.html?page=3>. — (Usage date: 17.02.2014).
4. Vunivere.ru [Electronic resource]. Исследование буровых долот с дисковыми и зубчато-дисковыми шарошками. — URL: <http://vunivere.ru/work15821/page3>. — (Usagedate: 17.02.2014).

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД НА ВЕЛИЧИНУ МЕХАНИЧЕСКОЙ СКОРОСТИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СОЧЕТАНИЯХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА БУРЕНИЯ И МЕХАНИЗМАХ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Д.С. Танаков, В.В. Ли

Научный руководитель: ассистент А.В.Епихин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Процесс разрушения горной породы является базовым при сооружении скважины. Количественной характеристикой его эффективности является величина механической скорости бурения. Известно, что процесс бурения – многофакторный, а механическая скорость будет зависеть от целого перечня показателей, которые в общем виде можно классифицировать следующим образом:

- горно-геологические (физико-механические свойства горных пород в разрезе, интервалы насыщенных пород, градиенты давлений по разрезу);
- технологические (параметры режима бурения, профиль скважины, способ бурения);

- технические (комплектность и эксплуатационные характеристики бурового оборудования, тип долота).

Традиционно достижение оптимальной механической скорости бурения определяется следующей последовательностью действий:

- проектирование параметров режима бурения, исходя из технических возможностей заказчика и горно-геологических условий (часто используются значения, полученные по опыту уже пробуренных скважин на данном кусте/площади/месторождении);

- корректировка параметров режима бурения по согласованию с инженерным составом заказчика, на которую накладываются конкретные условия по наличию оборудования на буровой и опыт уже сооруженных скважин);

- корректировка параметров режима бурения, базирующаяся на опыте и профессионализме бурильщика, а также показаниях станций геолого-технической информации.

Анализируя предложенный алгоритм легко прийти к выводу, что серьезное влияние на подбор условий достижения оптимальной механической скорости оказывает человеческий фактор и принятие за основу опыта уже пробуренных скважин. Это рано или поздно приводит к снижению эффективности процесса сооружения скважины.

Во-первых, любая скважина – это уникальный строительный объект, который сооружается в неповторимых условиях. Во-вторых, при установке параметров режима бурения человеком ключевой задачей является увеличение механической скорости бурения, которая часто не учитывает оптимальные эксплуатационные характеристики, техническое состояние используемого оборудования и опасность возникновения осложнений. Таким образом, при локальном увеличении механической скорости в дальнейшем можно получить преждевременный выход из строя оборудования и различные осложнения, ликвидация которых компенсирует полученную ранее эффективность.

Следовательно, особую актуальность получает направление, связанное с моделированием технологических процессов в бурении. Возможность «предсказывать» разрушение горных пород, умело сочетать основные факторы процесса бурения и горно-геологические условия – это залог высокого коэффициента полезного действия процесса. Задача исследования состоит в том, чтобы построить модель, на основании которой можно будет прогнозировать дальнейшие процессы бурения. Суть моделирования динамических процессов в нелинейной науке сводится к решению задач на базе трех последовательных действий: модель – алгоритм – программа [1].

Известно, что эффективность процесса бурения определяется целым комплексом свойств разрабатываемых пород, а также характеристиками техники и технологии разрушения [2]. Также существенное влияние оказывает принцип взаимодействия породоразрушающего элемента и разрабатываемого массива. Воздвиженский Б.И. [3] доказал, что не существует общего показателя разрушаемости, пригодного для характеристики горных пород применительно ко всем способам бурения. Так, различные породы могут находиться в различных категориях шкалы буримости в зависимости от многих факторов: глубины скважины, способа бурения и др. Создание комплексных критериев свойств горной породы и классификации для каждого отдельного случая не позволит получить высокие показатели эффективности при практическом применении. Поэтому лучше всего зарекомендовали те критерии, в которых комплексно обобщаются и учитываются характеристики процесса разрушения и свойства самих горных пород.

Например, один из вариантов представления эффективности разрушения через соотношение двух характеристик: интенсивности разрушения  $P$ , которая определяется техникой и технологией процесса, и комплексного показателя свойств горных пород  $W$ , который характеризует трудность их разрушения [4]. Учитывая, что эффективность процесса разрушения увеличивается с ростом  $P$  и уменьшением  $W$ , то ее показатель можно представить в следующем виде (1):

$$K_p = \frac{P}{W} \quad (1)$$

Характеристика  $P$  определяется затратами энергии на разрушение горной породы и перемещение разрушенной массы. Эффективность первой составляющей принимается пропорционально интенсивности процесса. А второе, то есть перемещение разрушенной породы, зависит от их объемной массы. Каждый конкретный способ разрушения приобретает свой отдельный критерий эффективности бурения. Определенное содержание критерия зависит от поставленной цели исследования. Для механического разрушения горных пород такими целями могут быть повышение производительности процесса, снижение износа и затупления инструмента и др.

Анализируя закономерности способов разрушения нетрудно заметить, что эффективность самого процесса определяется в первую очередь свойствами горных пород. Теория и практика наглядно показывают, что скорость бурения обратно пропорциональна прочности пород [5] (2):

$$V_{бур} \sim \frac{1}{[\sigma]^n} \quad (2)$$

Для различных способов бурения показатель степени  $n$  изменяется от 0,5 до 2. В качестве прочностной характеристики в расчетных формулах часто используют коэффициент крепости, прочность при растяжении, сжатии, сдвиге или их обобщенную характеристику. Помимо этого на удаление шлама требуются дополнительные затраты энергии, что требует учета объемного веса горных пород. На основе этого анализа академиком Ржевским В.В. [6] предложен показатель относительной трудности бурения, где  $A$  и  $B$  – коэффициенты, введенные из соображений размерности (3):

$$P_6 = A \cdot (\sigma_{сж} + \tau_{сдв} + B \cdot \gamma) \quad (3)$$

Считается, что скорость бурения обратно пропорциональна величине показателя  $L_b$ , но применительно к современным установкам ударного бурения это справедливо только для пород средней крепости и выше. В слабых трещиноватых породах энергия удара расходуется на измельчение породы и эффективность бурения сильно падает. Однако при вращательном бурении показатель  $L_b$  вполне может являться адекватной оценкой процесса только для горных пород невысокой крепости. В прочных породах объемное разрушение почти прекращается, и вооружение долота начинает переходить в режим истирания, который мало зависит от прочности пород. Исходя из всего этого, данный показатель нельзя использовать для расчета параметров конкретных способов бурения, но он весьма полезен для относительной оценки различных пород по сопротивляемости разрушению [7].

Кроме того, важно определить свойства горных пород, которые могут в значительной степени повлиять на механическую скорость бурения.

- **Буровая пористость.** Буровая пористость – это пористость, значение которой получено по данным процесса бурения. Она не является полным эквивалентом пористости, полученной по керну (шламу), хотя в ряде случаев их значения близки. Анализ зависимости буровой пористости от величины удельной работы разрушения показывает, что она близка к логарифмической или степенной зависимости для различных категорий горных пород [8].

- **Упругие свойства горных пород.** В общем случае горные породы не соответствуют модели упругого тела. Так, на вид зависимости напряжений от деформации влияет скорость нагружения. Именно поэтому нужно помнить, что определение показателей упругих свойств горных пород не означает, что горные породы – идеально упругие тела, а преследует цель оценить проявление упругих свойств в более сложной модели тела при стандартных методах испытания. Для минералов и некоторых горных пород зависимость нагрузки от перемещения при деформации линейная, то есть выполняется закон Гука и в этом случае можно определить модуль упругости по формуле [9]:

$$E_{сж} = \frac{\Delta P \cdot l}{F \cdot \Delta l} \quad (4)$$

где  $F$  – начальная площадь поперечного сечения образца,  $\Delta l$  – изменение длины образца, соответствующее изменению нагрузки на величину  $\Delta P$ .

Если же кривизна значительна, то график нагрузка – растяжение разбивают на ряд участков с одинаковым шагом по нагрузке. По участкам значение модуля также определяется из вышеуказанного выражения, а среднее значение по формуле:

$$E = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n E_i \quad (5)$$

Установлено, что при прочих равных одинаковых условиях повышение песчаности породы ведет к увеличению ее модуля Юнга. Для глинистых сланцев модуль Юнга возрастает по мере увеличения их карбонатности. Значительно влияют на величину  $E$  состав и строение цементирующего вещества у обломочных горных пород. Так, песчаники с карбонатным цементом обладают большим модулем Юнга, чем те, которые имеют глинистый цемент. При прочих равных условиях с увеличением влажности пород модуль Юнга уменьшается.

Модуль Юнга является одной из характеристик прочности горных пород, следовательно, его уменьшение приведет к уменьшению эффективности разрушения, а значит механической скорости бурения.

- **Прочностные характеристики горных пород.** Любые исследования эффективности разрушения горных пород строятся на оценке прочностных характеристик. Поэтому большинство математических моделей, описывающих эффективность процесса разрушения, представлены в виде зависимостей механической скорости бурения от прочности, твердости, буримости горных пород. При прочих равных условиях, чем выше прочностные свойства и характеристики пород, тем меньше эффективность их разрушения, а значит механическая скорость бурения (см. рис. 1).

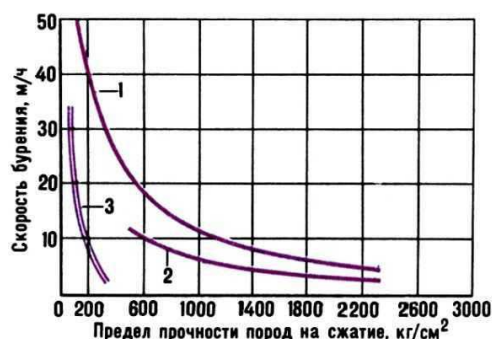


Рис. 1. Зависимость механической скорости бурения от значения прочностных характеристик горных пород для: 1 – бурения шарошечными долотами, 2 – ударного бурения, 3 – бурения лопастными долотами.

- **Абразивность.** Абразивность – это способность горной породы изнашивать породоразрушающий инструмент, воздействующий на нее. Прямой зависимости между величиной абразивности и механической скоростью бурения нет, но если рассматривать процесс разрушения как комплексный процесс, то ее влияние очевидно. При неверном планировании параметров режима бурения при заданном уровне абразивности массива

резко возрастет степень износа породоразрушающего инструмента. Это снизит эффективность работы инструмента, следовательно, и механическую скорость бурения.

Обобщающей характеристикой физико-механических свойств горных пород является категория их буримости [11], которая характеризуется либо как способность горной породы сопротивляться разрушению, либо как интенсивность сооружения горной выработки в массиве горных пород. В общем виде она объединяет в себе прочностные показатели горных пород, величину абразивности и практический опыт разрушения данных пород. Категории буримости не имеют универсального вида, а зависят от типа (механизма) разрушения, благодаря чему они классифицируются [12]:

- для вращательного механического бурения на двенадцать категорий;
- для вращательного бурения шнеками на шесть категорий;
- для ударного механического бурения на семь категорий;
- для ударного механического бурения при разведке россыпных месторождений на шесть категорий;
- для ручного ударно-вращательного бурения на шесть категорий.

Исходя из этой классификации, сделан вывод, что при проектировании режима бурения важно учитывать не только буримость горных пород, являющуюся обобщенным показателем ее физико-механических свойств, но и механизм разрушения. Практика бурения показала, что для определенных горно-геологических условий бурения можно рекомендовать использование конкретного породоразрушающего инструмента, как наиболее эффективного. Например, в мягких пластичных горных породах наиболее эффективным механизмом разрушения является резание. Для средних и твердых пород наиболее подходит дробящий или дробяще-скалывающий механизм. Для крепких и очень крепких горных пород, особенно, обладающих высокой абразивностью – истирающе-режущий механизм разрушения.

Встречаются такие категории породоразрушающих инструментов, которые с высокой эффективностью разрушают различные по буримости категории горных пород. Но представление в качестве цели высокой механической скорости в данном случае не позволяет оценить качество процесса проводки ствола в целом. Важно помнить о необходимости снижения износа породоразрушающего инструмента, обеспечения ему таких условий работы, которые бы являлись профилактикой аварийных ситуаций. Следовательно, правильный подбор типа породоразрушающего инструмента для конкретных горно-геологических и технологических условий – залог поддержания высокой эффективности бурения и стабильной работы инструмента на протяжении длительного времени.

Логично, что заданный интервал бурения может быть сложен различными по типу и физико-механическим свойствам горных пород. Закономерна ситуация, основанная на закономерностях разрушения горных пород различными механизмами, при которой для сооружения одного технологического интервала потребуются использование нескольких различных породоразрушающих инструментов. Не смотря на то, что такой подход теоретически учитывает особенности разрушения различных пород по буримости и оптимальные технические подходы для его обеспечения, его реализация не позволит повысить эффективность бурения в целом, поскольку потребует множества спускоподъемных операций и технологических простоев. Таким образом, достижение максимально эффективного разрушения техническими характеристиками долота, снижение его износа и учет физико-механических свойств горных пород при разрушении не является панацеей. Следовательно, ключевым связующим звеном, призванным обеспечить максимально эффективное разрушение породы и поддержание высокого технического состояния оборудования, является технология бурения или совокупность параметров режима бурения. Именно оптимальный баланс параметров режима бурения, их регистрация и контроль в забойных условиях позволят поднять коэффициент полезного действия бурения до максимальной величины.

Таким образом, анализ проблемы достижения максимальной эффективности механического бурения позволяет сделать следующие выводы:

- механическая скорость бурения зависит от совокупного влияния перечня факторов: технические особенности породоразрушающего инструмента, технология и параметры режима бурения, горно-геологические условия и физико-механические свойства горных пород по разрезу;
- для каждой категории горных пород существует оптимальные: механизм разрушения, совокупность параметров режима бурения и их комбинации, правильный выбор которых является гарантом достижения высоких механических скоростей;
- чем выше пористость и влажность породы, тем выше механическая скорость бурения;
- чем выше прочностные свойства породы, ее абразивность и категория буримости, тем ниже механическая скорость бурения.

#### Литература

1. Белоконь Станислав Владимирович. Оперативное управление процессом бурения скважин по данным станций геолого-технологических исследований : диссертация кандидата технических наук : 25.00.15.- Москва, 2001.- 221 с.: ил. РГБ ОД, 61 02-5/474-3
2. Ситников Николай Борисович. Моделирование и оптимизация процесса бурения геологоразведочных скважин . диссертация кандидата технических наук : 05.13.07.- Екатеринбург, 2000.-350 с.
3. Воздвиженский Б.И., Мельничук И.П., Пешалов Ю.А. Физико-механические свойства горных пород и влияние их на эффективность бурения. – М.: Недра, 1973. – 240с.

4. Латышев О.Г., Рыбак В.П. Критерий оценки эффективности процесса разрушения горных пород. Изв. вузов. Горный журнал. 1985. №12. С. 1-5.
5. Миндели Э.О. Разрушение горных пород. – М.: Недра, 1975. – 600с.
6. Ржевский В.В. Процессы открытых горных работ. – М.: Недра, 1974. – 520с.
7. Латышев О.Г. разрушение горных пород. – М.: Теплотехник, 2007. – 672 с.
8. Лукьянов Э.Е. Материалы компании ЗАО НПП ГА «Луч».
9. Спивак А.И., Попов А.Н. Разрушение горных пород при бурении скважин: Учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М: Недра, 1986, - 208 с.
10. Борщевский С.В., Дрюк А.А., Сирачев А.Ж. К вопросу об увеличению водонепроницаемости монолитной бетонной крепи вертикальных стволов большого диаметра. В монографии «Новые технические решения при строительстве выработок, тампонаже и закреплении горных пород»: Монография под общ.ред. Довжикова П.Н., Рябичева В.Д. – Донецк: Норд-Пресс, 2006. – С.138-148.
11. Тангаев И. А., Буримость и взрываемость горных пород, М., 1978.
12. Mosgeonet: разведочное бурение. Специальность 130203 «Технология и техника разведки месторождений полезных ископаемых»/Интернет-ресурс. URL: <http://www.mosgeonet.ru/library/014/> (дата обращения: 24.03.2014 г.).

## ИССЛЕДОВАНИЯ ПРЕИМУЩЕСТВ ВО ВЗАИМОДЕЙСТВИИ PDC–ДОЛОТА С ГРУНТОМ.

**А.В. Фатеев, А.А. Слепокуров**

Научный руководитель: доцент П.В. Бурков

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*

В данной работе будет рассмотрено взаимодействие долота PDC и шарошечного долота с грунтом.

Долото шарошечное (англ. roller cone bit) – это особосложные изделия, изготовленные из высококачественных сталей, твердых сплавов и других материалов, предназначены для сплошного бурения нефтяных, газовых, геологоразведочных скважин, а также скважин различного назначения в горнодобывающей промышленности, нефтегазовой отрасли и строительстве.

PDC-долота (polycrystalline diamond cutters – поликристаллические алмазные резцы) это породоразрушающий инструмент, разработанный для бурения скважин в осложненных горно-геологических условиях, а также для бурения протяженных интервалов, где проходка за один рейс является ключевой задачей для заказчика. Конструкция, разработанная для конкретных условий бурения, позволяет использовать их с различными компоновками низа бурильной колонны, для бурения вертикальных, наклонно-направленных и горизонтальных участков скважин [1].

Для данного исследования по сравнению двух типов долот, шарошечного и PDC, выбираются, в качестве пробуриваемой породы, суглинков, как наиболее часто встречаемый грунт при буровых работах.

В качестве режущих инструментов, будут использованы шарошечное долото, а также PDC-долото режущего действия. Последнее используется при бурении рыхлых и связных пород I-IV категории по буримости, что, в свою очередь, наиболее приспособлено к бурению выбранной породы.

Для построения модели возникающих напряжений в грунте при работе долот и суглинка, необходимо задать некоторые данные по грунту:

- Коэффициент Пуассона принимается равным для грунтов: крупнообломочных – 0,27; песков и супесей – 0,30; суглинков – 0,35; глин – 0,42.

- Модули упругости выбранного материала составляют 70-180 МПа (70-100 МПа при обработке связных грунтов).

- Плотность суглинка при естественной влажности 14...19 % составляет от 1500 до 1600 кг/м<sup>3</sup>.

Мы в своем анализе приняли: коэффициент Пуассона – 0,35; модуль упругости 120; плотность грунта – 1550 кг/м<sup>3</sup>.

Учитывая эти данные, строится модель взаимодействия шарошечного долота и долота PDC с грунтом.

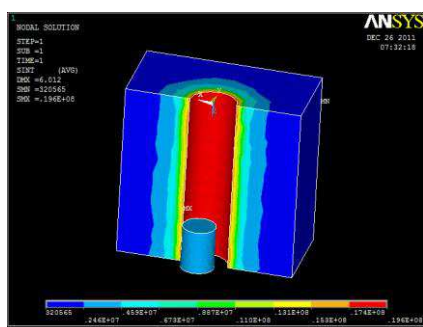


Рис. 1 Напряжения, возникающие в грунте, при работе шарошечного долота

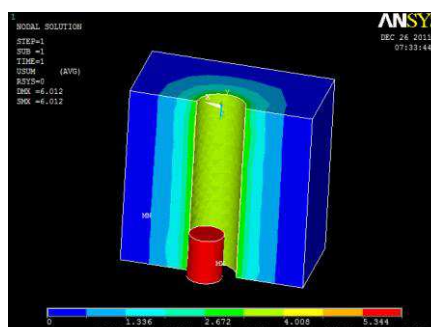


Рис.2 Напряжения, возникающие в грунте, при работе PDC долота