Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
1965, т. 105

УДК 622.243.051.64

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ВЫСОКООБОРОТНОГО АЛМАЗНОГО БУРЕНИЯ

Г.А.БЛИНОВ, В.И.ВАСИЛЬЕВ,
В.П.ЛИПАТНИКОВ

Развитие и широкое внедрение высокооборотного алмазного бурения в практику геолого-разведочных работ на твердые полезные ископаемые требует изучения характера непосредственного взаимодействия алмазной коронки с горной породой, так как именно здесь следует искать основные факторы, влияющие на эффективность разрушения горной породы и работоспособность породоразрушающего инструмента.

Анализ состояния изученности характера работы алмазной коронки на забое скважины позволяет сделать следующее обобщение – в настоящее время единый подход к изучаемому процессу отсутствует. Одни исследователи выдвигают гипотезы, касающиеся самой природы явления разрушения (состояние горной породы, переход из одного состояния в другие); другие рассматривают чисто внешние признаки процесса (глубина борозды, форма борозды и т.п.); третьи, пытаясь объединить выводы первых двух, рассматривают кинематику движения индентера. В результате одни и те же характеристики процесса: резание, скалывание, вспахивание, царапание, эрозия и т.д. – понимаются по-разному.

В разработке проблемы можно выделить два основных направления: исследование взаимодействия единичного индентера с образцами горных пород и изучение взаимодействия с горной породой групп индентеров, объединенных в жестком теле – коронке. Второе направление исследований является, на наш взгляд, более научным и перспективным, так как простое суммирование показателей работы единичного резца, как показал опыт, не дает действительной и полной картины процесса, происходящего на забое скважины.

При выработке концептуальных взглядов на процесс алмазного бурения необходимо учитывать следующее:

1) при передаче энергии на алмаз (или группу алмазов) возможно разрушение горной породы при первых же актах его (их) взаимодействия с породой;

2) при статическом и динамическом воздействии алмаза на горную породу выделены три стадии ее разрушения: поверхностная; с образованием уплотненного ядра мелкодиспергированного материала; объемная, с выколом породы по бокам и впереди алмазного резца;

3) при движении алмаза по породе перед его лобовой частью действуют сжимающие напряжения, сзади – растягивающие;

4) разрушение горных пород твердыми индентерами не зависит от типа резца и способа его применения и носит общий характер, выражающийся в том, что при взаимодействии породоразрушающего инструмента с горной породой образуются зоны разрушения и предразрушения, т.е. процесс различается только количественными характеристиками параметров, зависящих от вида индентера.

Весьма существенно помочь пониманию процесса взаимодействия коронки с породой может обращение к прогрессивно развивающейся науке о трении и износе - трибонике. Один из виднейших исследователей в этой области, автор молекулярно-механической теории сухого и граничного трения и износа И.В.Крагельский отмечает, что в основе этой теории лежит учет дискретности контакта двух твердых тел, обусловленной шероховатостью и волнистостью поверхностей контакта, которые имеют место на любых твердых поверхностях. Внешнее трение осуществляется на отдельных пятнах контакта размером 0,1-30 мкм (в зависимости от сформировавшейся шероховатости). Пятна контакта возникают в результате деформации неровностей (внедрение и смятие). Деформации по своему характеру могут быть упругими и пластичными. Неотъемлемой частью этой теории является определение граничных условий, характеризующих изменение свойств фрикционного контакта и определяющих износостойкость взаимодействующих тел [4].

Из основных положений трибоники применительно к алмазному бурению правомерно отнести следующие:

1) контактирующие поверхности пары алмазная коронка - горная порода являются шероховатыми;

2) внешнее трение имеет двойственную природу и обусловлено как преодолением сил молекулярного взаимодействия между поверхностями, так и преодолением механических сопротивлений, связанных с формоизменением поверхностного слоя;

3) при нарушении фрикционной связи не по поверхности двух тел, а в глубине материала, внешнее трение переходит во внутреннее (микрорезание). Порог внешнего трения определяется формулой Крагельского - Дуянова [4].

Торец матрицы алмазной коронки, представленный как шероховатое тело, будет контактировать с породой пятнами касания, размеры которых составляют несколько десятков микрометров. При скольжении коронки по породе в зонах пятен касания в результате работы сил трения выделяется определенное количество тепла. Расчеты показывают, что температура в этих зонах составляет 190-200 °С [1, 3].

Экспериментальные работы по определению коэффициента трения алмазов по различным породам в разнородной среде, проведенные в ВИТРе, показывают, что в воздухе и воде эти коэффициенты мало отличаются друг от друга, т.е. можно предположить, что в обоих случаях наблюдается сухое трение. Тепло в обоих случаях отводится за счет генерирования его в горную породу, матрица охлаждается промывочной жидкостью.

Таким образом, для эффективного отвода тепла необходимо обеспечить алмазу возможность постоянно контактировать все с новыми слоями породы

(естественно, при постоянном охлаждении матрицы коронки). Если в силу различных обстоятельств (высокая твердость горной породы, неправильно выбранные режимные параметры бурения и др.) надлежащая углубка не обеспечивается, то температура на контакте резко растет, что вызывает повышенный износ алмазов в месте пятна касания. Его площадь увеличивается, сам контакт становится более гладким, удельное давление на контакте изменяется, коэффициент трения уменьшается, достигая определенного минимума. Образуется пара трения с упругим контактированием (пара стремится к равновесной шероховатости).

Этот процесс известен в бурении как заполирование алмазной коронки (необходимо различать заполирование алмазов и матрицы). Можно отметить также, что указанная пара трения устойчива в очень твердых (XI-XII категории по буримости) породах и сравнительно легко разрушается в менее твердых породах при изменении параметров режима бурения.

На износ алмазной коронки при нормальном течении процесса бурения существенно влияет относительное сближение[x] контактирующих поверхностей. В зависимости от него изменяется глубина внедрения алмазов и микронеровностей матрицы. Так как процесс связан с интенсивным теплообразованием, а количество выделяемого тепла зависит от площади соприкосновения, то при определенном заглублении индентеров количество отдаваемого породе тепла будет меньше вновь образуемого. Это увеличит износ алмаза, и при переходе через нормированный уровень наступит стадия повышенного износа алмазов.

В соответствии со сказанным выше выделяют три стадии протекания процесса алмазного бурения: I) заполирование алмазной коронки (алмазов или матрицы, или того и другого одновременно); 2) нормальный процесс бурения; 3) нарушение нормального процесса бурения, вызванное повышенным износом алмазного инструмента. Математически эти три стадии процесса можно выразить в виде неравенства $h_{\text{ПВТ}} \leqslant h_{\text{Н}} \leqslant h_{J_{\text{Н}}}$, где $h_{\text{ПВТ}}$ – величина углубки, соответствующая условию перехода к микрорезанию; $h_{\text{Н}}$ – глубина внедрения индентеров; $h_{J_{\text{Н}}}$ – величина углубки, соответствующая нормируемой интенсивности изнашивания.

Используя известные в трибонике положения, а именно формулу Крагельского – Друянова, которая определяет условие перехода от внешнего трения к микрорезанию [4], и основное уравнение изнашивания, нами получено аналитическое выражение трех стадий процесса взаимодействия пары алмазная коронка – порода:

$$\frac{r}{4}\sqrt{\frac{r^2}{16} - \frac{\mu_c F'_{\text{Н}}}{\pi\sigma_{\text{т}}}} \leqslant h_{\text{Н}} \leqslant \left(\frac{J_{\text{Н}} k_1 r}{N\alpha\gamma}\right)^2, \qquad (\text{I})$$

где r – радиус шарового индентера (алмаза); μ_c – коэффициент сопротивления движению индентера; $F'_{\text{Н}}$ – нормальная нагрузка на единичный шаровой индентер; $\sigma_{\text{т}}$ – предел текучести горной породы; $J_{\text{Н}}$ – нормируемая интен-

[x] Относительное сближение $\varepsilon = h_{max}/R_{max}$, где h_{max} – величина внедрения алмазов в горную породу; R_{max} – радиус наибольшего выступа алмаза в данном профиле.

сивность изнашивания; k_1 – коэффициент, зависящий от геометрической формы индентеров и расположения их по высоте; N – количество циклов (проходов алмаза), необходимых для разрушения горной породы в определенном месте забоя; α – коэффициент перекрытия, равный отношению контурной площади контакта к фактической[x]; γ – коэффициент, равный отношению контурного давления к фактическому давлению на контакте.

В практике алмазного бурения вообще и высокооборотного в частности показатель углубка коронки за оборот h приобретает все большее значение. Наши собственные исследования, а также работы В.Г.Кардыша, М.Г.Глазова, В.К.Володченко и других исследователей показывают, что использование этого показателя позволяет разрабатывать технологию бурения скважин при проектировании режимов бурения на качественно новом уровне. Действительно, величина углубки прямо связана с частотой вращения n и механической скоростью бурения $v_м$: $h = v_м / 6 \cdot 10^{-2} n$.

Величина углубки, как видно из выражения (I), зависит от размеров алмазов r, сопротивления породы резанию $\mu_c F'_н$ и свойств породы $\sigma_т$. Эти показатели теоретически и практически могут быть определены. Известны также численные значения углубки (для алмазных коронок 0,03–0,09 мм за оборот [2]). На основе большого числа производственных и экспериментальных исследований подтверждена прямая связь между величиной алмазов r, твердостью горных пород K и механической скоростью $v_м$ (рис.I). Величины n и $v_м$ определяются трещиноватостью горных пород, применяемым оборудованием и инструментом, а также выбранным критерием оптимизации процесса бурения (чаще всего используется критерий экономически обоснованной механической скорости бурения, связанный с минимальной стоимостью I м бурения). Таким образом, процесс бурения сводится к управлению одним регулируемым параметром – нагрузкой, нормальной к поверхности износа $F_н$.

Этот параметр, в свою очередь, зависит от размеров и качества алмазного сырья, и поэтому может быть ограничен определенными значениями, в пределах которых и обеспечивается поддержание заданного значения углубки коронки за оборот [2].

При исследовании процесса изнашивания алмазных коронок, работающих на высоких частотах вращения, нами использован метод расчета линейного износа двух сопрягаемых тел, предложенный А.С.Прониковым [4], в результате чего получено аналитическое выражение суммарного линейного износа $И_{к-п}$ пары коронка – порода

$$И_{к-п} = \frac{F_н n}{R_к - r_к} t \left(k'_1 + k'_2 \right), \qquad (2)$$

где $R_к$ и $r_к$ – наружный и внутренний радиусы коронки; t – время износа; k'_1 и k'_2 – коэффициенты пропорциональности.

---

[x] Фактическая площадь касания (ФПК) в триботехнике – это сумма дискретных площадок, по которым происходит взаимодействие двух шероховатых поверхностей (в отличие от номинальной площади касания (НПК), т.е. площади, по которой происходило бы касание тел с идеально гладкими площадями); в нашем случае ФПК – это сумма площадей контактов отдельных алмазов матрицы коронки с горной породой. Контурная площадь касания (КПК) – площадь поверхностей ограниченная контуром, в пределах которого возникают фактические пятна касания.

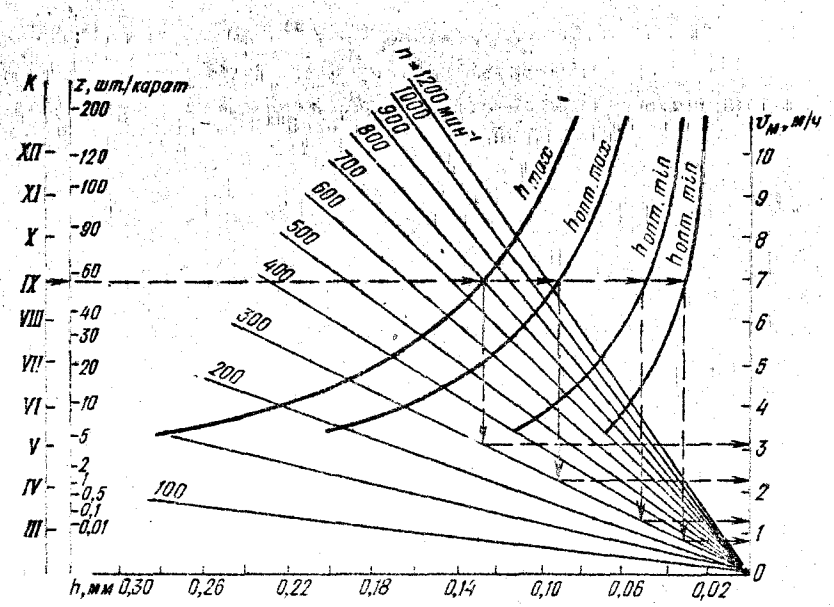


Рис.1. Определение механической скорости бурения $v_м$ по оптимальной углубке за оборот h в зависимости от зернистости алмазов z и категории пород по буримости K. Ход решения номограммы: $K \to z \to (h_{max} \div h_{min}) \to n \to v_м$

Анализ формулы (2) показывает, что для сохранения равномерного процесса износа сопрягаемой пары необходимо поддерживать соотношение $F_н \cdot n = const$. Рассмотрим этот вопрос несколько подробнее.

На ранних этапах внедрения алмазного бурения влияние изменения $F_н$ и n на производительность являлось в достаточной степени дискуссионным, одни исследователи считали, что необходимо увеличивать оба параметра одновременно, другие – что соотношение этих величин должно оставаться постоянным. Изучение процесса алмазного бурения позволило установить, что увеличение каждого из рассматриваемых параметров приводит к росту скорости бурения, и для увеличения производительности бурения необходимо увеличивать и частоту вращения, и нагрузку на инструмент.

Рациональная технология высокооборотного бурения априорно требует применения максимально высоких частот вращения. Однако в процессе работы алмазной коронки наступает такой момент, когда забойная мощность $N_з$ начинает превышать возможности привода буровой установки. Учитывая, что $N_з = f(F_н, n)$, приходится уменьшать частоту вращения, переходя на более низкую передачу станка, и для поддержания нормального процесса износа коронки и породы увеличивать нагрузку на инструмент $F_н$. Учитывая, что прочность алмаза много выше прочности горной породы и $И_К \ll И_П$, увеличение нагрузки в данном случае будет интенсификатором износа породы (рис.2). Увеличение нагрузки сосуслоено ростом фактической площади контакта коронки с породой, связанным с увеличением площади контакта каждого единичного алмаза по мере его износа. Таким образом, в рассматриваемом случае уменьшение n требует увеличения $F_н$, т.е. соотношение $F_н n$ должно выдерживаться постоянным, как это следует из выражения (2).

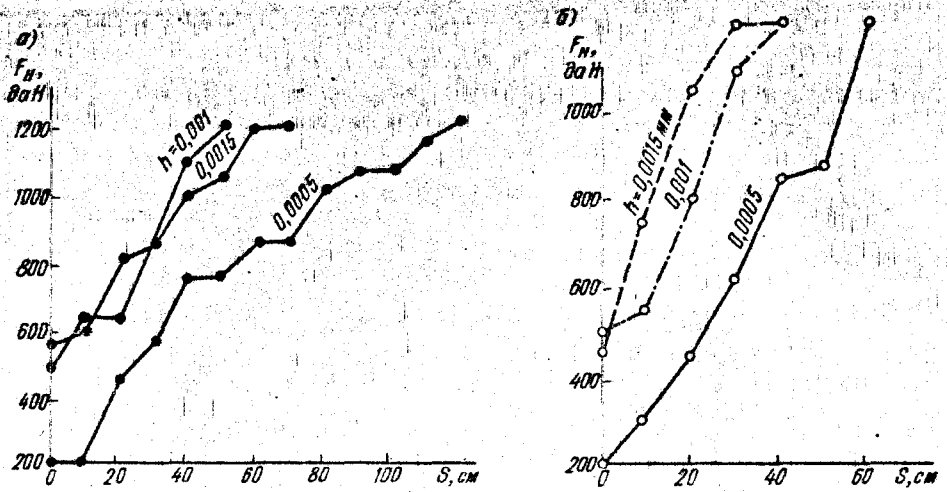


Рис.2. Характер изменения нагрузки на коронку $F_н$ для поддержания постоянной величины ее углубки h в зависимости от длины рейса S при частоте вращения 1000 мин$^{-1}$ (а) и 1500 мин$^{-1}$ (б)

Резюмируя сказанное, можно отметить, что при обсуждении вопроса о взаимосвязи параметров $F_н$ и n следует четко разграничивать, какой вопрос обсуждается: либо общие закономерности влияния отдельных параметров на производительность процесса бурения, либо вопросы, связанные с поддержанием нормального хода процесса разрушения горной породы.

В статье не рассматриваются вопросы очистки забоя скважины и способы отвода тепла от исследуемой пары трения, хотя при высокооборотном алмазном бурении эти вопросы весьма важны. Достаточно сказать, что согласно расчетам возможно появление температурных вспышек до 1700 °С [1] на пятнах контакта при высоких частотах вращения. Научные исследования и практика работ убеждают, что в первую очередь необходимо совершенствовать промывочную систему и геометрию матрицы алмазных коронок [5], причем при его рассмотрении целесообразно, по нашему мнению, использовать методы, применяемые в триботехнике.

Задачей дальнейших исследований является углубление знаний о процессе, происходящем на забое скважины; представление полученных аналитических зависимостей в виде, пригодном для инженерных расчетов; разработка практических рекомендаций по технологии высокооборотного алмазного бурения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреева А.А., Блинов Г.А. Исследование процесса бурения при сверхвысоких скоростях вращения алмазных микрокоронок. – В кн.: Методика и техника разведки. Сб. научн. трудов / ВИТР, 1974, № 90.

2. Васильев В.И., Каулин В.А., Зорин В.Н. Величина углубки породоразрушающего инструмента за оборот – важнейший фактор при разработке параметров режима высокообо-

ротного бурения. – В кн.: Разработка и совершенствование технологии алмазного бурения в сложных горно-геологических условиях. М., изд. ВПО „Союзгеотехника", 1983.

3. Илларионова Т.М., Горин В.Н. Критическая скорость вращения алмазных коронок с учетом температурной стойкости алмазов при использовании традиционных промывочных жидкостей (воды, глинистого раствора). – В кн.: Методика и техника разведки. Сб. научн. трудов / ВИТР, 1978, № 121.

4. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М., Машиностроение, 1977.

5. Липатников В.П. Исследование гидравлических характеристик потока промывочной жидкости в зоне „горная порода – коронка". – В кн.: Разработка и совершенствование технологии алмазного бурения в сложных горно-геологических условиях. М., изд. ВПО „Союзгеотехника", 1983.