

УДК 622.24

РАЗРАБОТКА НАУЧНОЙ БАЗЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАБОЙНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ РАБОТЫ С ДОЛОТАМИ PDC

К.И. Борисов

Томский политехнический университет

E-mail: kibor@tomline.ru

Рассмотрены актуальные вопросы проектирования характеристик высокомоментных забойных двигателей для работы с современными породоразрушающими инструментами типа PDC. На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований и анализа установлена объективная взаимосвязь между комплексным коэффициентом сопротивления резанию $K_{рс}$ в объемном режиме динамического резания горных пород и показателем удельного момента на долоте m , являющимся базой для расчета крутящих моментов на экстремальных режимах работы забойных двигателей. Сформулированы предложения по использованию показателя $K_{рс}$ при проектировании оптимальных энергетических характеристик гидравлических забойных машин, эксплуатируемых с современными инструментами режущее-скалывающего действия.

Ключевые слова:

Долото, PDC, коэффициент сопротивления резанию, показатель удельного момента на долоте, энергетические характеристики забойного двигателя, проектирование.

Key words:

Drill bit, PDC, cutting resistance coefficient, indicator of the specific moment on a drill bit, power characteristics of the downhole drill motor, design.

Современное состояние научно-технического развития в отечественной буровой отрасли делает, в частности, весьма актуальной разработку новых научных подходов к повышению эффективности проектирования оптимальных характеристик гидравлических забойных двигателей с использованием инструментов режущее-скалывающего действия (РСД) нового поколения с алмазно-твердосплавными пластинами.

Это обусловлено как расширением объемов использования инструментов РСД, так и развитием парка и характеристик новых забойных машин, эксплуатируемых при бурении скважин на нефть и газ.

Проблемой повышения эффективности проектирования характеристик гидравлических забойных двигателей (ЗД), в том числе и высокомоментных для работы с инструментами режущее-скалывающего действия при бурении скважин, занимались в разное время многие исследователи.

Решением отдельных ее аспектов посвящены работы виднейших российских ученых П.П. Шумилова, Р.А. Иоанесяна, Э.И. Тагиева, М.Т. Гусмана, Д.Г. Малышева, Ю.Р. Иоанесяна, С.С. Николаева, Н.Д. Деркача, Ю.В. Захарова, Б.В. Байдюка, М.Р. Мавлютова и других [1–4].

Исследования отечественной научной школы посвящены разработке и промышленному внедрению конструкций и технологии бурения с гидравлическими забойными двигателями гидродинамического и объемного типов, включая вопросы проектирования их характеристик.

Несмотря на то, что создана богатая научная база по теории и практике использования забойных двигателей при бурении нефтяных и газовых скважин, к настоящему времени имеются определенные пробелы в понимании процессов формирования исходных данных для проектирования необхо-

димых характеристик ЗД при работе с породоразрушающими инструментами класса PDC (Polycrystalline Diamond Compact).

Поэтому весьма актуальными являются исследования проблемы, восполняющие пробелы в данной области. Главной целью исследований является разработка научно обоснованного способа объективной оценки действующих крутящих моментов на разрушение горных пород современными инструментами режущее-скалывающего действия, необходимых для обоснования и выбора энергетических характеристик гидравлических забойных двигателей.

Анализ научной литературы по способам проектирования оптимальных характеристик забойных машин [2, 3] показал, что большинство исследований, выполненных по данной тематике, указывают на важность показателя удельного момента на долоте m как базы для расчета крутящих моментов на экстремальных (рабочих) режимах работы ЗД.

Однако детальное изучение физической сущности, поведения и способов количественного определения удельного момента показывает, что в исследуемом вопросе, в части использования ЗД с пород разрушающими инструментами РСД, есть нерешенные вопросы.

В частности, ряд ученых [2] принимают линейную зависимость удельного момента от динамических сил резания вне зависимости от режимов разрушения горных пород. Другие авторы [3] подчеркивают наличие количественной зависимости показателя m от свойств горных пород. С другой стороны, известны полевые исследования и испытания гидравлических ЗД, которые не подтверждают эти данные [5].

В связи с этим для объективного понимания физической сущности и количественной оценки

удельного момента на долоте целесообразно рассмотреть и изучить реальные процессы динамического «резания горных пород» современными долотами типа PDC, включающие переходные процессы, процессы истирания породы, одновременного внедрения и перемещения резца со снятием «стружки».

Решение этого вопроса позволит достоверно и точно формировать исходную базу для проектирования характеристик современных забойных машин для бурения нефтяных и газовых скважин.

Методологический подход, использованный автором для оценки физической сущности показателя «удельного момента», основан на исследовании объективной количественной взаимосвязи силовых характеристик динамической системы «резец долота–горная порода» на различных режимах процесса резания породы [5, 6].

Сущность его заключается в следующем: контактные давления при динамическом резании горных пород, меньшие, чем необходимые для отделения объемных частиц породы от разрушаемого массива, — так называемого «объемного разрушения» — вызывают только абразивное (контактное) «истирание» пород.

При этом взаимосвязь силы «резания» F_p (другими словами, крутящего момента на долоте) и осевой нагрузки G_0 определяется в общем случае значением коэффициента трения физической пары «резец–порода» в конкретной среде μ .

Более высокие контактные нагрузки и давления, вызывающие процессы реальных объемных нарушений в горной породе и отделение частиц породы от массива при движении единичного породоразрушающего элемента, фундаментально изменяют силовую картину процесса резания: количественное взаимоотношение между силой резания и осевой нагрузкой переходит на другой качественный и количественный уровень. Их взаимосвязь становится существенно сложнее и определяется не только процессами трения, через коэффициент трения, но и начальными процессами перехода к объемному разрушению через условно названный нами «коэффициент сопротивления разрушению» μ_p [7].

В науке для характеристики указанной переходной стадии разрушения и формы дезинтеграции твердого тела (горных пород) используется условный термин «усталостное» разрушение.

Выделенный нами коэффициент μ_p характеризует объективно новое взаимоотношение между действующими силами динамического резания горных пород в качественно новой стадии их разрушения — переходе от усталостного разрушения к объемному.

Предложено суммарную величину двух выше указанных характеристик рассматривать как «комплексный коэффициент сопротивления резанию K_p » [8]:

$$K_p = \mu + \mu_p.$$

Приложение к резу (долоту) на очередном этапе динамического процесса резания более высоких осевых разрушающих нагрузок на горную породу будет приводить к закономерному росту абсолютных значений силы резания, коэффициента μ_p , а следовательно, и комплексного коэффициента K_p .

Однако важно подчеркнуть, что такой процесс объективно происходит до определенного предела — предела сопротивления данной горной породе динамическому внедрению режущего элемента данного размера и конкретной геометрии.

В конечном счете с дальнейшим ростом абсолютных значений прикладываемых сил резания и, как следствие, объемов разрушения под резцом в конкретной системе «резец–порода» наступает момент стабилизации коэффициентов μ_p , K_p , а следовательно, и количественной пропорции между силами динамического резания — осевой нагрузкой G_0 и горизонтальной силой резания F_p (крутящим моментом для долота).

Такое состояние динамического процесса влечет стабилизацию значения комплексного коэффициента $K_p=K_{pc}$ и объективно свидетельствует о завершении «истирающе-усталостного» режима динамического резания породы и переходе его в качественно новую, объемную стадию.

Данные выводы полностью вытекают из математической модели динамического резания горных пород резами инструментов РСД, предложенной автором [9]:

$$h = \frac{G_0}{b \cdot H_{вд} \cdot K_p}, \quad (1)$$

где G_0 — осевая нагрузка на долото; h — глубина динамического резания; b — ширина резца долота; $H_{вд}$ — динамическая твердость горной породы.

Преобразование выражения (1) и последующий анализ подтверждает существование объективной фазы динамического процесса резания, характеризующейся стабилизацией значения коэффициента $K_p=K_{pc}$ при достижении им установившейся объемной стадии разрушения горной породы (2):

$$K_{pc} = \frac{F_p}{G_0} = \text{const}, \quad (2)$$

где $F_p=hb \cdot H_{вд}$ — сила резания, действующая в момент завершения начального «истирающе-усталостного» режима динамического резания породы и перехода его в установившуюся объемную стадию.

Дальнейший рост силового механического нагружения режущего элемента не изменяет количественного взаимоотношения между силами резания, определяемого коэффициентом K_{pc} , в связи с отсутствием объективных предпосылок для роста его составляющих — коэффициентов трения и сопротивления объемному разрушению.

Выводы о характере поведения и стабилизации значения комплексного коэффициента сопротивления резанию $K_p=K_{pc}$ при наступлении объемного

режима динамического резания горных пород в последующем доказаны автором экспериментально [10, 11].

Для экспериментальной оценки поведения и получения количественных значений показателя K_p использована схема проведения измерений по методу «жестко фиксированного резца» (рис. 1). Сущность процесса единичного измерения заключается в следующем. Породоразрушающий элемент (резец) установленной для данной методики формы и размеров закрепляется в силоизмерительном устройстве, жестко зафиксированном на массивном основании.

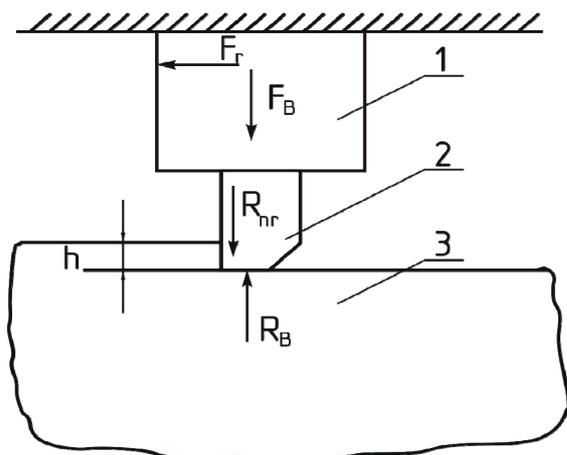


Рис. 1. Схема динамического резания образца породы с жестко фиксированным резцом в силоизмерительном устройстве. 1 – цифровой динамометр; 2 – породоразрушающий элемент (резец); 3 – исследуемый образец горной породы

В целях достижения технологичности и точности измерений производится резание (строгание) исследуемого образца горной породы в процессе его перемещения (протягивания) относительно неподвижного резца.

Процесс строгания (резания) в целях достижения точного моделирования работы режущих элементов буровых долот производится при переменной толщине снимаемого слоя (уступа) h , от нулевого значения до величины, соответствующей моменту достижения коэффициентом K_{pc} установившегося (максимального) значения, т. е. в момент наступления режима объемного разрушения.

Таким образом, схема получения исходных данных для расчета показателя K_p наглядно и точно моделирует работу резового инструмента во всех режимах разрушения горных пород при их динамическом резании.

Для реализации указанной схемы использована установка УМР [10, 11]. Уникальность этого экспериментального комплекса заключается в том, что за один эксперимент фактически удается провести моделирование силовой картины динамического резания кернового образца во всех известных режимах разрушения горных пород – от истирания до объемного разрушения горной породы. Последнее исключительно важно при получении необхо-

димых силовых характеристик для расчета показателя K_p .

Фактическим, но исключено информативным результатом единичного эксперимента по резанию керна на установке УМР, является так называемая «силовая кривая», типовой вид которой для процесса резания горной породы, представлен на рис. 2.

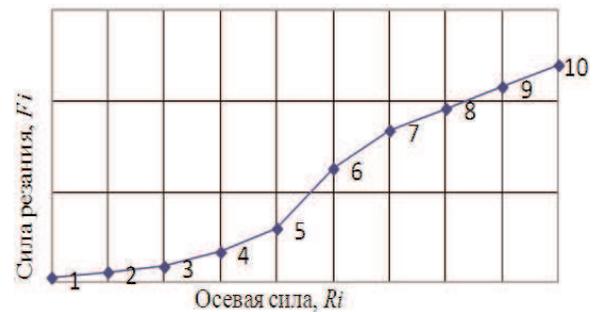


Рис. 2. Типовая силовая картина резания единичным резцом

Силовая кривая включает несколько характерных участков, характеризующих проявление различных режимов разрушения горной породы при динамическом резании. В частности, участок 1–2 характеризует начальный истирающий, и переходный истирающе-усталостный 3–7 периоды процесса разрушения горной породы резанием. Участок 7–10 свидетельствует о выходе процесса на стационарное объемное разрушение исследуемой горной породы, а следовательно, и о количественной стабилизации коэффициента сопротивления K_p для конкретной пары «резец–порода».

Как видно из рис. 2, типовой характер взаимодействия между силами динамического резания не носит строго линейного характера и не зависит от конкретных свойств горных пород.

Но именно вследствие этого характеристика силового взаимодействия сил резания через коэффициент K_p может наиболее объективно оценивать такую важную характеристику для проектирования забойных машин, как «удельный момент на долоте» m .

В частности, если для горных пород данного района бурения экспериментально получена динамическая характеристика горных пород K_p , то определение удельного момента m можно произвести на базе этого нового показателя. Нетрудно установить, что K_p имеет с показателем m взаимосвязь типа:

$$m = K_p R_d, \quad (3)$$

где R_d – радиус долота.

Усредненные значения удельных моментов m для Западной Сибири, рассчитанные по формуле (3) для объемного режима разрушения горных пород, и по результатам испытаний ГЗД и электробуров, приведены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что расчетные данные формулы (3) превышают статистические результаты более чем в 2 раза.

Таблица 1. Удельные моменты m долот PDC для месторождений Западной Сибири (объемный режим)

| Регион | Тип долота | Удельный момент, m | |
|-----------------|----------------------------|------------------------------------|-----------------------|
| | | По формуле 3 (объемное разрушение) | По испытаниям ЗД [10] |
| Западная Сибирь | PDC диаметром 195...295 мм | 0,09–0,15 | 0,040–0,050 |

Данное сравнение свидетельствует о том, что испытания ЗД производилось на режимах разрушения горных пород, значительно отличающихся от оптимальных, т. е. объемных режимов динамического резания.

Для случая реализации истирающего или усталостно-истирающего режима работы породоразрушающего инструмента с алмазно-твердосплавными пластинами фактические и расчетные данные практически совпадают (табл. 2).

Таким образом установлено, что предложенный автором показатель K_p может и должен успешно использоваться в практических методиках по проектированию высокомоментных забойных двигателей для случая использования современных инструментов типа PDC на оптимальных режимах разрушения горных пород.

Таблица 2. Удельные моменты m долот PDC для месторождений Западной Сибири (усталостно-истирающий режим)

| Регион | Тип долота | Удельный момент, m | |
|-----------------|----------------------------|---|-----------------------|
| | | По формуле 3 (усталостно-истирающее разрушение) | По испытаниям ЗД [10] |
| Западная Сибирь | PDC диаметром 195...295 мм | 0,06–0,08 | 0,04–0,05 |

Поэтому необходима дальнейшая работа по формированию ведомственного руководящего до-

кумента по выбору ЗД, основанного на результатах исследований автора.

Выводы

Предложение научной общественности для объективной оценки и идентификации режимов динамического резания горных пород использовать показатель силового взаимодействия процесса разрушения K_p является важным научным решением для практических целей при проектировании оптимальных энергетических характеристик гидравлических забойных машин, эксплуатируемых с современными инструментами РСД [11].

Представленные научные результаты в необходимом для практического использования объеме, для проектирования современных забойных машин, детализируют выполненный автором комплекс аналитического и экспериментального изучения динамического процесса разрушения горных пород инструментом режущее-скалывающего действия с алмазно-твердосплавными пластинами типа StrataRax™ в рамках нового научного направления по методике объективной оценки прочностных свойств и эффективности динамического разрушения горных пород резанием при бурении скважин.

В частности, аналитически доказан процесс стабилизации силовой картины динамического резания при выходе на объемный режим разрушения буримых горных пород на основе комплексного коэффициента сопротивления резанию K_p . Указанный объективный процесс получил экспериментальное подтверждение, что позволило впервые предложить коэффициент K_p для использования в важнейших практических приложениях в качестве количественного показателя для проектирования характеристик высокомоментных забойных машин для механического вращательного бурения скважин с инструментами PDC.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусман М.Т. и др. Забойные винтовые двигатели для бурения скважин. – М.: Недра, 1981. – 232 с.
2. Методическое руководство по определению и использованию показателей свойств горных пород в бурении. РД 39-3-679-82. – М.: ВНИИБТ, 1983. – 93 с.
3. Методические указания по проектированию и выбору рациональных энергетических характеристик турбобуров. РД 39–0148052–6.019–86. – М.: ВНИИБТ, 1986. – 30 с.
4. Филимонов Н.М., Абаков Г.С., Мавлютов М.Р. Методическое руководство по использованию показателей механических свойств горных пород для определения их буримости и разработки режимов бурения. – Уфа: УНИ, 1979. – 30 с.
5. Борисов К.И. Методика оценки эффективности процесса динамического резания горных пород инструментами режущее-скалывающего действия // Нефтяное хозяйство. – 2008. – № 8. – С. 112–113.
6. Борисов К.И. Методика оценки динамических прочностных свойств горных пород и эффективности процесса разрушения горных пород инструментами режущее-скалывающего действия // Бурение и нефть. – 2008. – № 1. – С. 24–27.
7. Борисов К.И. Прикладные аспекты нового научного метода оценки свойств и эффективности процесса разрушения горных пород // Бурение и нефть. – 2010. – № 3. – С. 24–27.
8. Борисов К.И. Динамика работы резцов в процессе разрушения горных пород инструментами режущее-скалывающего действия типа PDC // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 1. – С. 161–164.
9. Борисов К.И. Актуальные научные и прикладные вопросы развития нового научного метода оценки свойств и эффективности динамического разрушения горных пород инструментами режущее-скалывающего действия типа «PDC» // Вестник Ассоциации Буровых подрядчиков. – 2010. – № 3. – С. 8–16.
10. Борисов К.И. Разработка научного метода объективной оценки процессов динамического разрушения горных пород инструментами режущее-скалывающего действия класса PDC. Ч. I // Инженер-нефтяник. – 2010. – № 4. – С. 23–26.
11. Борисов К.И. Разработка научного метода объективной оценки процессов динамического разрушения горных пород инструментами режущее-скалывающего действия класса PDC. Ч. II // Инженер-нефтяник. – 2011. – № 1. – С. 31–35.

Поступила 11.02.2013 г.