

ПОКАЗАТЕЛИ И ПАРАМЕТРЫ РАБОТЫ ДОЛОТ ПРИ СТЕНДОВОМ БУРЕНИИ

Трушкин О.Б.

Уфимский государственный нефтяной технический университет

Оценка эффективности вновь разработанной конструкции породоразрушающего инструмента, связанная с дорогостоящими и мало информативными промысловыми испытаниями, по которым сложно дать однозначное заключение. При промысловых испытаниях особенно ценной является информация об основных силовых параметрах работы породоразрушающих инструментов: осевой нагрузке, изгибающем и крутящем моментах, причем не только о средних значениях этих параметров, но и о их текущих значениях, изменяющихся с частотой до 300 Гц. Из-за несовершенства существующих систем измерения в процессе бурения информации об указанных параметрах не достаточно. Проблема осложняется еще и тем, что на работу долота оказывают большое не однозначное влияние такие условия испытаний, как вид привода, конструкция низа бурильной колонны, свойства промывочной жидкости и ряд других факторов. Поэтому для устранения такого влияния прибегают к стендовым испытаниям, которые с полной базой данных о показателях и параметрах работы долота и соответствующим анализом этой базы позволяют оперативно и с минимальными затратами оценить эффективность конструкции нового породоразрушающего инструмента, а при необходимости наметить пути по его совершенствованию. Исходя из этого разработаны и созданы автономные измерительные устройства трех силовых параметров работы породоразрушающих инструментов в скважинном и стендовом вариантах.

Стендовый вариант автономного измерительного устройства, оснащенного датчиком оборотов долота, совмещенного с датчиком запуска прибора, установлен на шпиндель бурового станка ЗИФ-1200. Для регистрации механической скорости проходки на шпинделе станка установлен дискретный оптический датчик перемещения шпинделя со шторкой, в которой прорезаны с шагом h мм щели шириной 0,5 мм. Это позволяло рассчитывать проходку за один оборот долота, усредненную в пределах регистрации результатов опыта. Система промывки стенда, состоящая из центробежного насоса, системы трубопроводов и

вертлюга на шпинделе, обеспечивала идеальную, с точки зрения удаления шлама, промывку забоя технической водой при всех возможных режимах бурения.

Разрезы значительного количества месторождений нефти и газа Западной Сибири и других регионов России представлены породами средней твердости. Для бурения этих пород применяют как шарошечные долота дробяще- скалы- вающего действия, так и породоразрушающие инструменты режуще-скалы- вающего действия с алмазно - твердосплавными пластинами (АТП). Для стендовых испытаний были отобраны следующие типы серийных долот: Ш215,9С-ГВ, Ш190,5С-ГВ, Ш190,5СЗ-ГВ, Ш190,5СЗ-ГАУ R27, 8Л-188,7 РСА и 8Л-188,7 РСА –F. При стендовом бурении использовался блок мрамора с габаритными размерами 1200×1200×1400 мм, который был закреплен на жестком постаменте станда. Блок имел следующие механические свойства - твердость по штампу $r_{ш} = 850$ МПа, предел текучести $r_0 = 600$ МПа, условный коэффициент пластичности $K = 1,7...2$ соответствуют породам средней твердости [1] для которых предназначены перечисленные выше долота. Следует отметить однородность блока породы по всему объему.

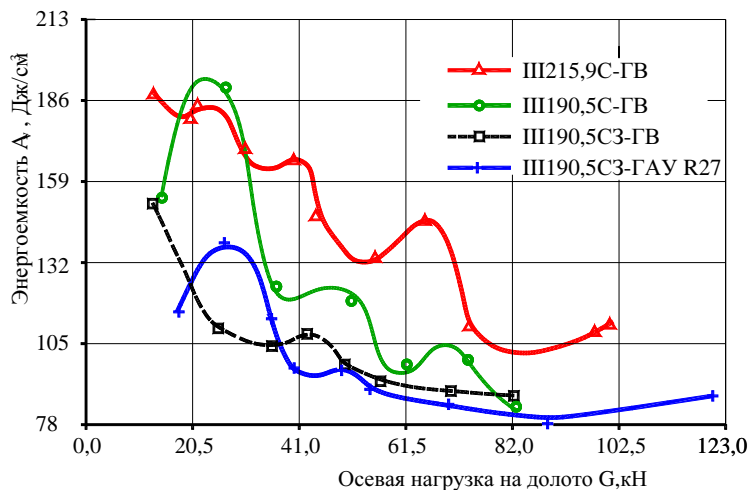


Рис. 1. Зависимость энергоемкости разрушения породы от осевой нагрузки

По результатам стендового бурения рассчитывались два показателя работы долот - проходка за один оборот долота δ и энергоемкость разрушения пород A_v . Независимыми, задаваемыми параметрами работы долот на стенде являлись средняя осевая нагрузка на долото G , частота вращения долота n_d , количество и

качество промывочной жидкости. При проведении стендовых экспериментов варьировала только средняя осевая нагрузка на долото, поэтому в дальнейшем рассматриваются зависимости показателей работы долот от осевой нагрузки, представленные графически. Закономерности изменения параметров и показателей работы долот от осевой нагрузки на него большинство исследователей [1,2] связывает со скачками и формами разрушения породы при бурении. Скачки разрушения обычно пытаются выделять по зависимостям проходки за один оборот долота и энергоемкости разрушения породы. График $\delta=f(G)$ для долота П215,9С-ГВ ярко выраженной ступенчатой формы, состоящий из четырех S-образных участков. Считается, что в пределах каждого участка подготавливается, формируется и развивается скачек разрушения породы с определенной формой ее разрушения. График $A_V=\varphi(G)$ (рис. 1) имеет вид ниспадающей, с увеличением G , скачкообразной кривой с четырьмя минимумами. Минимумы энергоемкости приходятся на концы S-образных участков, которые соответствуют полностью сформировавшимся формам разрушения породы под элементами вооружения долота. Таким образом, диапазон осевой нагрузки на это долото от 14,8 до 115,8, приведенный к диаметру 190,5 мм, обеспечивал на стенде четыре скачка разрушения породы, и все последующие выявленные закономерности будут справедливы в пределах этих скачков. Первый скачек происходит в диапазоне осевой нагрузки 18...19 кН при проходке за один оборот долота 0,25 мм и энергоемкости 180,7 Дж/см³, второй скачок в диапазоне $G = 34 \dots 36$ кН при $\delta=0,45$ мм и $A_V=163,3$ Дж/см³, третий в диапазоне $G = 53 \dots 54$ кН при $\delta=0,92$ мм и $A_V=132,2$ Дж/см³, а четвертый в диапазоне $G = 83 \dots 85$ кН при $\delta=2,19$ мм и $A_V=101,9$ Дж/см³.

Следует отметить, что величины нагрузок, соответствующие определенным скачкам разрушения, справедливы только для породы с отмеченной выше твердостью, однако, в пределах этого класса пород, но с другой твердостью эти нагрузки могут быть пересчитаны по известным формулам [1,2].

Вид зависимостей $\delta=f(G)$ и $A_V=\varphi(G)$ для долота П190,5С-ГВ аналогичен соответствующим зависимостям для долота П215,9С-ГВ и в диапазоне осевой нагрузки 14,6...82,7кН также было достигнуто четыре скачка разрушения.

Первый скачек происходит в диапазоне осевой нагрузки 14...15 кН при проходке за один оборот долота 0,19 мм и энергоемкости 153,6 Дж/см³. Второй

скачок в диапазоне $G = 38 \dots 39$ кН при $\delta=0,51$ мм и $A_V=119,7$ Дж/см³, третий в диапазоне $G = 60 \dots 61$ кН при $\delta=1,29$, мм и $A_V=95,3$ Дж/см³, а четвертый - $G = 83 \dots 84$ кН при $\delta=2,45$ мм и $A_V=84,0$ Дж/см³. Несмотря на одинаковые по форме элементы вооружения долот типа "С" одноименные скачки происходят при разных величинах осевой нагрузки (при приведенной к диаметру 190,5 мм для долота Ш215,9С-ГВ). Так первый скачок достигается при меньших нагрузке G на 4,0 кН (на 22%) и проходке за оборот на 0,06 мм (на 24%) и энергоемкость на 27,1 Дж/см³ (на 15%). Это можно объяснить меньшим притуплением зубьев долота Ш190,5С-ГВ и наклонным расположением зубьев по отношению к образующим первой и второй шарошек.

Второй и третий скачки разрушения достигаются при более высоких осевых нагрузках на 4,0 кН (на 12%) и на 7,0 кН (на 13%), проходках за оборот на 0,06 мм (на 13%) и на 0,37 мм (на 40%) и более низких энергоемкостях на 43,6 Дж/см³ (на 27%) и 36,9 Дж/см³ (на 28%) соответственно. Четвертый скачок разрушения достигается у обоих долот при одинаковой осевой нагрузке, но большей проходке за один оборот у долота Ш190,5С-ГВ на 0,26 мм (на 12%) и меньшей энергоемкости на 17,9 Дж/см³ (на 18%). Такие несовпадения объясняются конструктивными различиями в расположении венцов на телах шарошек, в количестве зубьев и шаге их размещения в венцах, а также в коэффициенте перекрытия забоя и кинематике долот. У долота Ш190,5С-ГВ коэффициент перекрытия на 12% больше за счет большей длины периферийных венцов, чем у долота Ш215,9С-ГВ. Тем не менее, для этих двух долот одинаковых по классу и назначению можно рассчитывать с погрешностью не более 15% одинаковые осевые нагрузки для достижения второго, третьего и четвертого скачков разрушения породы.

Зависимость $A_V=\varphi(G)$ для долота Ш190,5СЗ-ГВ имеет всего два минимума, но в интервале осевой нагрузки 0...12,8 кН можно ожидать еще один минимум, соответствующий первому скачку разрушения породы. Такое предположение основывается на том, что зубки этого долота, имеющие торовидную вершину, начинают контактировать с забоем по весьма маленькой поверхности и скачек разрушения достигается при небольшой нагрузке на долото. Исходя из этого предположения первый минимум на графике $A_V=\varphi(G)$ следует отнести к второму скачку разрушения, а второй к третьему. Второй скачок разрушения достигается в

диапазоне осевой нагрузки 35...36 кН при проходке за один оборот 0,77 мм и энергоемкости 104,2 Дж/см³, а третий в диапазоне 82...83 кН при $\delta=2,4$ мм и $A_V=87,7$ Дж/см³. Следует отметить, что переход от второго скачка разрушения к третьему происходит на весьма протяженном участке по осевой нагрузке. Это можно объяснить весьма значительным приростом контактной площади зубков при проходке за один оборот долота свыше 1,5 мм по сравнению с долотами со стальным вооружением.

Для долота Ш190,5СЗ-ГАУ R27 зависимость $A_V=\varphi(G)$ имеет три минимума. Первый минимум следует отнести к первому скачку разрушения породы, при этом, диапазон осевой нагрузки 17...18 кН, при котором образуется этот скачек, практически совпадает с приведенным к диаметру нагрузкам для долота Ш215,9С-ГВ, несмотря на различную форму рабочей поверхности элементов вооружения. Второй и третий минимумы соответствуют второму и третьему скачкам разрушения. Второй скачок разрушения происходит в диапазоне нагрузок 43...44 кН, при $\delta=0,97$ мм и $A_V=94,4$ Дж/см³, а третий в диапазоне $G=88...89$ кН, при $\delta=3,0$ мм и $A_V=78,4$ Дж/см³. Поскольку у рассматриваемого долота форма рабочей поверхности зубков, как и у долота Ш190,5СЗ-ГВ, такова, что при увеличении проходки за оборот интенсивно увеличивается площадь контакта, то и переход от первого скачка разрушения ко второму и от второго к третьему происходит на весьма протяженных по осевой нагрузке участках. По причине значительного увеличения площади контакта зубков с забоем на долоте Ш190,5СЗ-ГАУ R27 было достигнуто только зарождение четвертого скачка разрушения породы при нагружении его в интервале 85...120 кН.

Как отмечалось выше по зависимостям $\delta=f(G)$ и $A_V=\varphi(G)$ можно оценить сравнительную эффективность конструкций долот. Так по проходке за один оборот наиболее эффективными являются долота с твердосплавным вооружением, причем, долото Ш190,5СЗ-ГВ по второй скачок разрушения включительно имеет преимущество перед долотом Ш190,5СЗ-ГАУ R27. Наихудшим по этому показателю является долото Ш215,9С-ГВ, причем, его проходка за оборот на некоторых участках в пределах третьего скачка разрушения в 1,7 раза ниже, чем у долота Ш190,5СЗ-ГАУ R27. Следует отметить, что при бурении скважин основная масса долот работает именно в пределах третьего

скачка разрушения. Оценка эффективности работы перечисленных выше долот по энергоемкости практически не отличается от оценки по проходке за оборот. Безусловно, энергия, подводимая к долоту в процессе бурения, в большинстве случаев не является дефицитом. Однако чем больше энергии подводится к забою через конструктивные элементы долота, тем больше они изнашиваются, а также больше отраженной от забоя энергии рассеивается в колонне буровых труб, приводя к появлению усталостных трещин в ее элементах. Поэтому, сервисным службам буровых предприятий целесообразно по результатам стендовых и промысловых измерений силовых и энергетических параметров работы долот искать среди долот одинаковых по типу, но разных по конструкции и по производителям долото, обеспечивающее наименьшую энергоемкость.

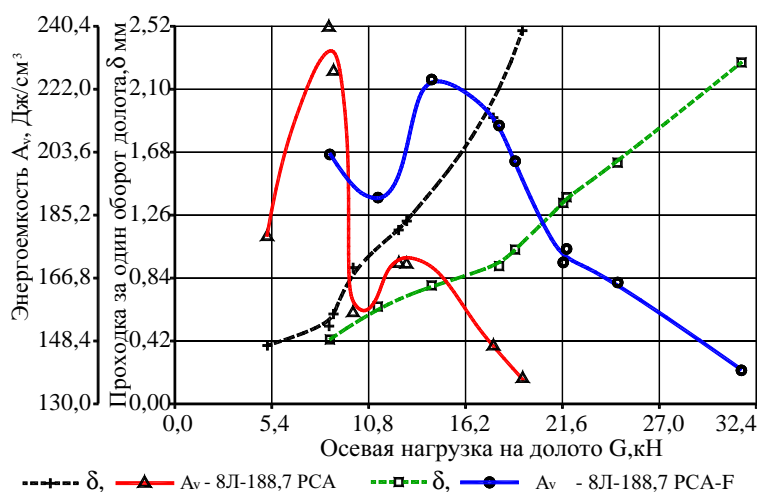


Рис.2. Зависимость проходки за один оборот долота и энергоемкости от осевой нагрузки

На рис.2 приведены графики зависимости $\delta=f(G)$ и $A_V=\varphi(G)$ для двух долот PCA. Также как и у шарошечных долот графики $\delta=f(G)$ имеют ступенчатую форму и состоят из двух S-образных участков. Графики $A_V=\varphi(G)$ имеют вид ниспадающих скачкообразных кривых. Такой вид этих зависимостей можно объяснить тем, что при бурении долотами PCA происходит не только объемное разрушение породы, как отмечают авторы работ [3,4], но и скачкообразное разрушение с точки зрения энергоемкости, при этом, в исследованном диапазоне нагрузок оба долота достигли, как минимум, второго скачка разрушения. Для долота 8Л-188,7PCA, которое вооружено пластинами с острыми кромками,

вполне вероятен минимум энергоемкости в диапазоне осевой нагрузки 0...5,2 кН, поскольку объемное разрушение мрамора начинается с проходки за оборот 0,3...0,4 мм [3,4]. В этой связи можно считать, что при бурении долотом 8Л-188,7РСА достигнуто три скачка по энергоемкости. Если скачкообразность разрушения породы вооружением шарошечных долот связывают с последовательным образованием нескольких объемных выколов за один акт взаимодействия элемента вооружения с забоем, то механизм скачкообразного разрушения породы резцами, оснащенными АТП, изучен весьма слабо.

Сопоставление графиков $\delta=f(G)$ показывает, что для долота, оснащенного резцами с фасками, график более пологий, как бы растянут по оси нагрузки, и смещен в область с большими нагрузками. Смещение таково, что для достижения одинаковой проходки за оборот долотом с АТП с фасками, осевую нагрузку на него надо создавать в среднем на 60% выше. Растянutosть графика $\delta=f(G)$ позволяет при поиске минимума энергоемкости в процессе долбления варьировать осевой нагрузкой в более широких пределах, что весьма актуально при глубоком наклонно- направленном бурении.

В исследованных диапазонах нагрузок средние значения энергоемкостей для обоих долот практически равны, а вариации относительно средних составляют $\pm 27\%$, то есть весьма существенны, что является подтверждением необходимости вести поиск минимума энергоемкости в промысловых условиях.

Наличие фаски на резцах АТП можно рассматривать, с некоторым допущением, как износ резцов с острыми кромками, равный величине фаски 0,5...0,7 мм. Тогда, с учетом изложенного выше, можно предположить, что износ АТП на предполагаемую выше величину не приведет к увеличению энергоемкости разрушения породы, если увеличить нагрузку на долото на 60%.

Следует отметить, что при стендовом бурении долотами РСА и шарошечными энергоемкости разрушения породы средней твердости отличаются незначительно.

К зависимым параметрам, которые измерялись при бурении, следует отнести такие силовые параметры как крутящий и изгибающий моменты, их коэффициенты динамичности и различные производные этих силовых параметров.

Крутящий момент на долоте является важной характеристикой

породоразрушающего инструмента. Его величина широко используется при выборе способа бурения, подборе забойного двигателя, расчете колонны бурильных труб на прочность, проектировании режима бурения. В исследованном диапазоне нагрузок на шарошечные долота крутящий момент плавно увеличивался в пределах 130...1600 Нм с небольшими перегибами. Зависимости $T = f(G)$ аппроксимируются полиномами второй или третьей степени, как отмечают практически все исследователи [1,2].

Определенный интерес представляют зависимости $T = f(G)$ для долот РСА, так как таких зависимостей не было получено до настоящего времени ни на стенде, ни в скважине. Зависимости (рис.3) имеют вид восходящих ступенчатых кривых, при этом, темп общего роста крутящего момента для долота, оснащенного пластинами с острыми кромками, выше в 1,7 раза, чем для долота, оснащенного пластинами с фасками. Следует отметить, что перегибы на кривых момента совпадают по осевой нагрузке с перегибами на зависимостях $\delta = f(G)$ и $A_V = \varphi(G)$, то есть отражают скачкообразность разрушения породы при бурении. В исследованном диапазоне нагрузок крутящий момент изменялся в пределах 310...1520 Нм. Нижние пределы крутящего момента для долот РСА превосходят в 2,4 раза соответствующие пределы для шарошечных долот, а верхние пределы практически совпадают. Одинаковые крутящие моменты для долот РСА и шарошечных достигаются при меньших осевых нагрузках, в 6 раз для долот РСА, оснащенных резцами АТП с острыми кромками, и в 3,7 раза для долот РСА, оснащенных резцами АТП с фасками. Эти соотношения следует учитывать при проектировании режимов бурения и непосредственно при поиске оптимума в процессе бурения на буровой.

При расчетах режимов бурения обычно пользуются таким параметром работы долота, как удельный крутящий момент $T_{уд}$. Недостаточность подробных стендовых и промысловых исследований силовых параметров работы долот привела к тому, что в большинстве расчетов принимают независимость $T_{уд}$ от нагрузки. Чтобы оценить влияние осевой нагрузки на $T_{уд}$ на рис.4 приведены графики зависимости $T_{уд} = f(G)$ для шарошечных долот. Общей тенденцией для всех шарошечных долот является рост удельного крутящего момента с увеличением нагрузки на долото. Так для долота Ш190,5СЗ-ГАУ R27 максимальное значение $T_{уд}$ на 62% больше минимального.

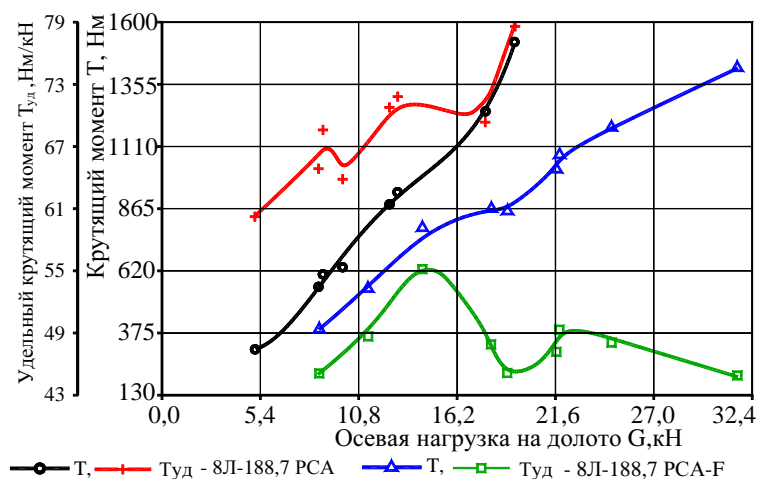


Рис.3. Зависимость крутящего и удельного крутящего моментов от нагрузки на долота РСА.

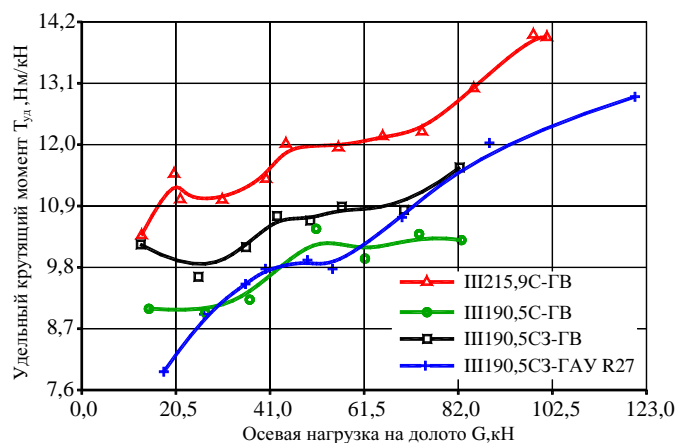


Рис.4. Зависимость удельного крутящего момента от осевой нагрузки на шарошечные долота.

Для долот Ш190,5С3-ГВ, Ш190,5С-ГВ и Ш215,9С-ГВ эта разница составляет соответственно 20%, 17% и 35%. Меньшая вариация удельного момента для долот Ш190,5С3-ГВ, Ш190,5С-ГВ объясняется не только конструктивными особенностями этих долот, но и более узким (в 1,48 раза меньше) диапазоном осевых нагрузок, в которых исследовалась работа этих долот.

Все зависимости $T_{уд}=f(G)$ имеют характерные перегибы, которые хорошо согласуются со скачками разрушения породы, выделенными выше по зависимостям $A_V = \varphi(G)$ (рис.1). Зеркальное, относительно оси G, отображение

каждого графика $T_{уд}=f(G)$ соответствует графику $A_v= \varphi(G)$. В этой связи можно по графикам или по уравнениям регрессии определять величины удельных крутящих моментов, соответствующие определенным скачкам разрушения породы. Относительное расположение графиков $T_{уд}=f(G)$ и $A_v= \varphi(G)$ одинаково, следовательно, среди долот одного типа (в данном случае среди шарошечных долот для бурения пород средней твердости) по величинам удельного крутящего момента можно оценивать эффективность выбора того или иного долота. Преимущества имеют долота с наименьшим удельным моментом.

Сопоставление средних значений для четырех исследованных шарошечных долот показало, что они отличаются максимум на 8,8%, то есть весьма незначительно. Поэтому при оценочных расчетах можно усреднить и эти значения и для всех шарошечных долот для бурения пород средней твердости диаметром 190,5 мм независимо от их класса по вооружению брать $T_{уд}$ равным 10,1 Нм/кН.

Как видно из рис. 3 удельный момент для долота 8Л-188,7 РСА (АТП с острыми кромками) интенсивно растет с увеличением нагрузки. Как и у шарошечных долот, зависимость $T_{уд}=f(G)$ имеет характерные перегибы, которые хорошо согласуются со скачками разрушения породы, выделенными выше по зависимости $A_v= \varphi(G)$ (рис.2.). В исследованном диапазоне нагрузок максимальный удельный момент на 31% больше минимального. Для долота 8Л-188,7 РСА –F (АТП с фасками) тенденции роста $T_{уд}$ с увеличением осевой нагрузки не наблюдается, но характерные перегибы, согласующиеся со скачками разрушения породы, выделяются. Максимальное значение $T_{уд}$ на 23% больше минимального. Среднее значение удельного момента для долота 8Л-188,7 РСА в 6,9 раза выше средних значений $T_{уд}$ для шарошечных долот и в 4,7 раза выше средних значений для долота 8Л-188,7 РСА –F.

Сбалансированность конструкции долота по вооружению и качество его изготовления определяются величиной изгибающего момента M , измеряемого в некотором сечении буровой колонны над долотом. Причинами возникновения изгибающего момента в некотором сечении колонны бурильных труб над долотом при его работе на забое являются: суммарный вектор осевых сил, действующих на элементы вооружения, если точка его приложения находится не на оси долота; суммарные вектора окружных и радиальных сил, действующие на

элементы вооружения, если они не равны нулю [6]. На рис.5. приведены графики зависимостей $M=f(G)$ для шарошечных долот.

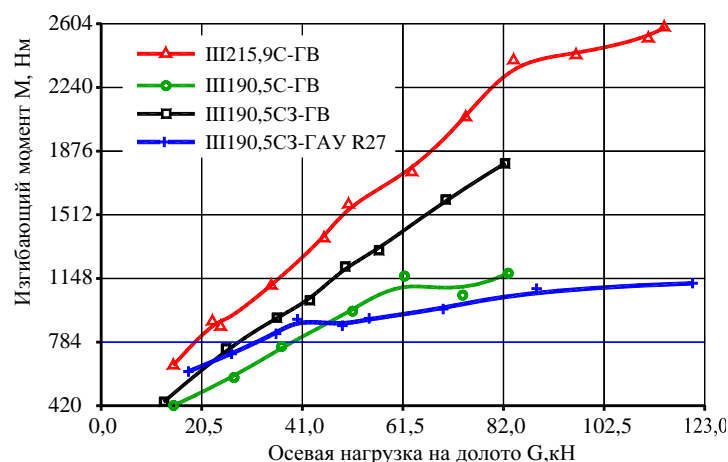


Рис.5. Зависимость изгибающего момента от осевой нагрузки на шарошечные долота.

С увеличением осевой нагрузки изгибающий момент для всех шарошечных долот растет, при этом, на зависимостях наблюдаются перегибы. Относительное расположение графиков показывает, что наибольший изгибающий момент создается долотом III215,9C-GB, а наименьший долотами III190,5C3-ГAU R27 и III190,5C-GB. Абсолютные значения изгибающего момента весьма велики, так для долота III215,9C-GB в диапазоне осевых нагрузок 84...115 кН, соответствующего четвертому скачку разрушения породы, изгибающий момент изменяется в пределах 2400...2580 Нм. В пределах второго скачка разрушения M , создаваемый долотом III215,9C-GB, в 1,7 раза выше, чем для долота III190,5C3-ГAU R27 и в 2,2 раза, чем для III190,5C-GB. В пределах третьего скачка эта разница увеличивается до 2,4 и 2,0 раз, а в пределах четвертого скачка до 3,0 и 2,5 раз соответственно. График изгибающего момента для долота III190,5C3-GB, занимает среднее положение.

Составляющая изгибающего момента от осевой нагрузки зависит от расстояния вектора \bar{G} до оси долота. У долота с хорошо сбалансированным вооружением и хорошего качества изготовления это расстояние в каждый момент времени должно быть минимальным. С увеличением нагрузки на такое долото увеличивается проходка за один оборот и увеличивается количество зубьев, взаимодействующих с забоем, вооружение загружается более равномерно и плечо

вектора \overline{G} относительно оси долота уменьшается. Интенсивность роста изгибающего момента на графике $M = f(G)$ должна в этом снижаться. Если вооружение долота плохо сбалансировано, например, на одной из шарошек геометрические параметры вооружения таковы, что суммарная осевая сила на нее, независимо от проходки за один оборот, значительно больше, чем на каждую из двух других, то для такого долота интенсивность роста изгибающего момента на графике $M = f(G)$ должна быть постоянной. Такой же эффект будет наблюдаться, если долото имеет такую технологическую погрешность как большая разновысокость одной из шарошек. Исходя из сказанного выше сбалансированность вооружения долота можно оценивать не только по абсолютной величине изгибающего момента, но и по виду графика $M = f(G)$, а именно по величине интенсивности роста изгибающего момента.

Для рассматриваемых шарошечных долот интенсивность роста изгибающего момента различная, наибольшие значения наблюдаются у долота Ш215,9С-ГВ, при этом в пределах первого – третьего скачков разрушения интенсивность роста изменяется незначительно, и ее среднее значение составляет 24,3 Нм/кН, а в пределах формирования и развития четвертого скачка разрушения (в диапазоне осевых нагрузок 84...114,8 кН) интенсивность роста изгибающего момента уменьшается в 3,5 раза. Абсолютное значение изгибающего момента в указанном выше диапазоне G увеличилось всего на 7,8%, то есть долото становится более сбалансированным по вооружению при проходке за один оборот 1,6...2,5 мм по причине, отмеченной выше.

В исследованном диапазоне нагрузок интенсивность роста изгибающего момента для долота Ш190,5С3-ГВ постоянная и составляет 20,3 Нм/кН, что на 20% меньше, чем для долота Ш215,9С-ГВ. Отсутствие участка с меньшей интенсивностью роста изгибающего момента, несмотря на большие величины проходок за один оборот долота (1,7...2,45 мм), можно объяснить несовершенством конструкции вооружения или разновысокостью одной из шарошек. Какая из шарошек значительно влияет на изгибающий момент можно оценить по графику суммарного воздействия изгибающего момента на корпус долота.

Для долота Ш190,5С-ГВ интенсивность роста изгибающего момента постоянная в пределах первых трех скачков разрушения и составляет 14,9 Нм/кН,

что на 36% меньше чем для долота Ш190,5С3-ГВ и на 63% меньше чем для долота Ш215,9С-ГВ. В пределах четвертого скачка разрушения породы изгибающий момент практически не растет.

Интенсивность роста изгибающего момента при бурении долотом Ш190,5С3-ГАУ R27 в пределах первого и формирования и развития второго скачков разрушения наименьшая и составляет 12,0 Нм/кН, что на 102,5% меньше чем для долота Ш215,9С-ГВ, на 69% чем для Ш190,5С3-ГВ и на 24% чем для Ш190,5С-ГВ. В пределах третьего и начале формирования четвертого скачков разрушения интенсивность роста составляет 2,9 Нм/кН, то есть всего 24%.

Таким образом, с точки зрения изгибающего момента наиболее сбалансированным по конструкции вооружения и точности изготовления является долото Ш190,5С3-ГАУ R27.

Изгибающий момент (рис.6.), создаваемый долотом 8Л-188,7 РСА при бурении в стендовых условиях, изменялся в пределах 480...960 Нм, а долотом 8Л-188,7 РСА –F в пределах 520...980 Нм, то есть пределы отличаются незначительно. У рассматриваемых долот РСА резцы АТП расположены не совсем симметрично на каждой двух диаметральных лопастях особенно два резца в центральной части. По этой причине можно предположить, что если выколы породы под симметрично расположенными резцами происходят одновременно, то вектор осевой нагрузки будет отстоять от оси долота на минимальном расстоянии.

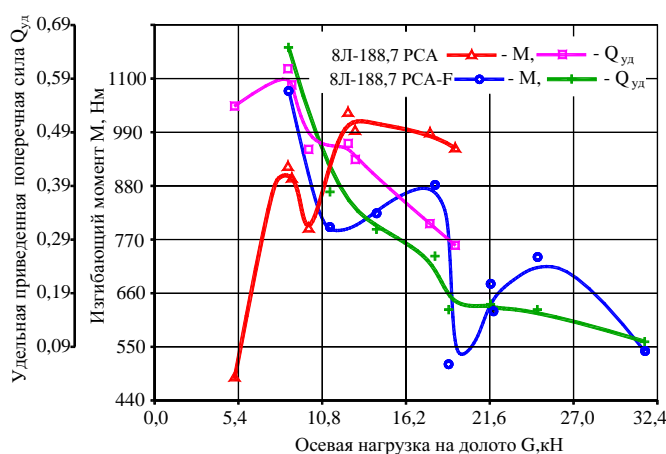


Рис.6. Зависимость изгибающего момента и удельной приведенной поперечной силы от осевой нагрузки на долота РСА.

Учитывая, что G при бурении этими долотами не превосходила 30 кН изгибающий момент, создаваемый осевой силой должен быть весьма небольшим. По причине симметричного расположения резцов и с учетом сделанного предположения крутящий момент должен создаваться уравновешенными относительно оси долота парами сил, которые не создают изгибающего момента. По этим же причинам радиальные силы, действующие на резцы, тоже не должны создавать изгибающего момента. Восемь симметричных калибрующих поверхностей так же не должны создавать изгибающего момента. Если выколы под соответствующими резцами будут происходить не одновременно, то вооружение долота будет создавать изгибающий момент, на его величину которого будет влиять скачкообразность разрушения породы с увеличением осевой нагрузки на долото.

Приведенные выше рассуждения будут справедливы при идеальной точности изготовления долота. Такие погрешности изготовления долота, как разновысокость резцов, расположенных на одном радиусе, биение калибрующих поверхностей долота относительно присоединительной резьбы будут приводить к появлению изгибающего момента, увеличивающегося с ростом осевой нагрузки на долото.

Приведенные на рис.6 графики зависимостей $M = f(G)$ показывают, что изгибающий момент с увеличением осевой нагрузки изменяется скачкообразно в полном соответствии со скачкообразностью графиков $A_v = f(G)$ (см. рис. 2). Минимумы изгибающего момента приходятся на минимумы энергоемкости.

Такой характер изменения M говорит о том, что изгибающий момент создается за счет не одновременного выкола породы под симметрично расположенными резцами. Для долота 8Л-188,7 РСА –F скачкообразность изменения M наблюдается на фоне общего снижения изгибающего момента с увеличением осевой нагрузки, а для долота 8Л-188,7 РСА на фоне общего роста. Тенденцию снижения M с увеличением G можно объяснить тем, что растет глубина погружения резца в породу, выколы породы происходят более одновременно и резцы на одном радиусе загружаются равномернее. Одной из причин тенденции роста изгибающего момента для долота 8Л-188,7 РСА может быть некоторое отклонение в точности изготовления.

Существенность величин изгибающих моментов, возникающих при работе

породоразрушающих инструментов, на устойчивость, прочность и выносливость колонны бурильных труб можно оценить по величинам эквивалентных моментов, действующих в сечении бурильной трубы, расположенном на расстоянии 175 мм от упорного торца резьбы (сечение, в котором измерялся изгибающий момент). При совместном действии изгиба с кручением эквивалентные напряжения по третьей и четвертой теориям прочности рассчитываются по формуле [5] :

$$\sigma_{III(IV)}^{экв} = \frac{M_{III(IV)}^{экв}}{W},$$

где W – осевой момент сопротивления поперечного сечения буровой трубы;

$M_{III}^{экв}$ - эквивалентный момент по третьей теории прочности:

$$M_{III}^{экв} = \sqrt{M^2 + T^2};$$

$M_{IV}^{экв}$ - эквивалентный момент по четвертой теории прочности:

$$M_{III}^{экв} = \sqrt{M^2 + 0,75T^2};$$

Из приведенных зависимостей следует, что величины изгибающего и крутящего моментов оказывают равноценное влияние на величину эквивалентного напряжения по третьей теории прочности, а по четвертой изгибающий момент оказывает даже большее влияние. Это дает право сопоставлять величины M и T , возникающие при работе породоразрушающих инструментов. Отношения M/T для всех долот, испытанных на стенде, с увеличением осевой нагрузки уменьшается. Для шарошечных долот отношение M/T лежит в пределах 4,3...0,72, а для долот РСА в пределах 2,5...0,4, то есть изгибающий момент весьма существенный и его необходимо учитывать при расчетах буровой колонны на устойчивость, прочность и выносливость. Использовать в расчетах величину изгибающего момента, измеренного в определенном сечении над долотом, не зная его изменения по буровой колонне весьма проблематично. Наиболее рационально в расчетных схемах бурильной колонны прикладывать к ее нижнему концу три силовые воздействия – осевую нагрузку G , крутящий момент T и приведенную поперечную силу Q . Поскольку величина изгибающего момента, а, следовательно, и Q , изменяются с изменением G , то для расчетов удобнее пользоваться удельной приведенной поперечной силой

$$Q_{уд} = \frac{Q}{G}.$$

Ниже приведены уравнения регрессии $Q_{уд} = f(G)$, которые могут быть использованы при оценочных расчетах буровой колонны на выносливость и устойчивость.

Для долота Ш190,5СЗ-ГАУ R27 в диапазоне $G = 17,9 \dots 120,5$ кН -

$$Q_{уд} = 0,28 - 0,005G + 37 \cdot 10^{-6} G^2 - 8,84 \cdot 10^{-8} G^3 + 0,01 \cdot \cos(0,12G + 0,08).$$

Для долота Ш190,5СЗ-ГВ в диапазоне $G = 12,8 \dots 82,3$ кН -

$$Q_{уд} = 0,24 - 31 \cdot 10^{-4} G + 23 \cdot 10^{-6} G^2$$

Для долота Ш190,5С-ГВ-в в диапазоне $G = 14,6 \dots 82,7$ кН -

$$Q_{уд} = 0,209 - 32 \cdot 10^{-4} G + 21 \cdot 10^{-6} G^2 + 0,014 \cdot \cos(0,1G + 0,7)$$

Для долота Ш215,9С-ГВ-в в диапазоне $G = 14,8 \dots 114,8$ кН -

$$Q_{уд} = 0,32 - 62 \cdot 10^{-4} G + 7,97 \cdot 10^{-5} G^2 - 3,55 \cdot 10^{-7} G^3$$

Для долота 8Л-188,7 РСА-F-в в диапазоне $G = 8,6 \dots 31,6$ кН -

$$Q_{уд} = 2,88 - 0,46G + 0,031G^2 - 92 \cdot 10^{-5} G^3 + 10^{-5} G^4$$

Для долота 8Л-188,7 РСА-в в диапазоне $G = 5,2 \dots 19,4$ кН -

$$Q_{уд} = 0,69 - 0,018G + 0,07 \cdot \sin(0,2G + 0,6)$$

Уравнения регрессии подобраны при следующих параметрах: коэффициент детерминации не менее 95%; значимость каждого члена уравнения оценивалась по параметру Стьюдента при уровне значимости $p=0,05$.

Для шарошечных долот удельная приведенная поперечная сила изменяется в пределах $0,05 \dots 0,25$ при среднем значении $0,14$, а для долот РСА уровень $Q_{уд}$ выше и изменяется в пределах $0,1 \dots 0,65$ при среднем значении $0,36$.

Литература

1. Спивак А.И., Попов А.Н. Разрушение горных пород при бурении скважин. - М.: Недра, 1994. - 261 с.: ил.
2. Попов А.Н. Исследование работы и изнашивания вооружения шарошечных долот при бурении скважин. – Дис.... докт. технич. наук. – Уфа, 1980.- 392 с.
3. Алексеев Л.А. Энергетические принципы разработки конструкции и режима отработки породоразрушающего инструмента режуще-скальвающего действия для бурения скважин. – Дис.... докт. технич. наук. – Уфа, 1986.- 349 с.
4. Кагарманов Н.Ф. Непрерывное разрушение горных пород при бурении скважин алмазно-твердосплавными долотами режуще-скальвающего действия. – Дис.... докт. технич. наук. – Уфа, 1983.- 455 с.
5. Филин А.П. Прикладная механика твердого деформируемого тела. Т.1. - М.: Наука, 1975. - 832 с.
6. Трушкин О.Б. Факторы, определяющие изгибающий момент в некотором сечении над долотом при его работе на забое. // Международная научно-техническая конференция "Повышение качества строительства скважин": Сб. науч. тр.- Уфа: Монография, 2005. – 360 с. - ISBN 5-94920- 040 – 3.