

УДК 622.24.051

ИССЛЕДОВАНИЯ СИЛОВЫХ И КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАБОТЫ ШАРОШЕЧНЫХ ДОЛОТ

Пуртова И.А.

ФГБОУ ВПО «Тюменский Государственный нефтегазовый университет Минобрнауки России», Тюмень, Россия, (625000, Тюмень, ул.Володарского, 38), e-mail:general@tsogu.ru

Предлагается обзор научных исследований, в котором изложены некоторые методики и результаты аналитического и экспериментального изучения силовых и кинематических характеристик работы шарошечных долот. Интерес к данной тематике объясняется ее большой практической значимостью. От эффективности работы бурового инструмента во многом зависят экономические показатели строительства скважин. Вместе с тем результаты исследований зачастую носят противоречивый характер, что вполне объяснимо высокой сложностью процессов, происходящих при работе долота на забое. Анализируемые работы сгруппированы по направлениям исследований. Приведен обзор основных работ, посвященных изучению кинематики шарошечных долот, взаимодействию элементов вооружения долот с разрушаемой породой, определению усилий и анализу напряженного состояния элементов вооружения и опор шарошечных долот с помощью различных экспериментальных методов и методов математического моделирования. Приведенный анализ известных результатов исследований по данному направлению не является исчерпывающим, но может быть полезен при дальнейшем изучении этого вопроса.

Ключевые слова: бурение, долото, шарошка, забой, порода, опора, вооружение шарошки, нагрузка.

INVESTIGATE THE FORCE AND KINEMATIC CHARACTERISTICS OF THE WORK ROLLER BITS

Purtova I.A.

Federal STATE budgetary educational institution of higher professional education "Tyumen State oil and gas University, Ministry of education and science of Russia, Tyumen, Russia, (625000, Tyumen, street Volodarskogo, 38), e-mail:general@tsogu.ru

A review of research, outlining some of the methodologies and results of analytical and experimental study of force and kinematic characteristics of the work roller bits. Interest in this topic due to its great practical importance. The efficiency of the drilling tool depends largely on the economic indicators of well construction. However, research results are often controversial, which is explainable by the high complexity of the processes occurring at the bit at the bottom. Analyzed the studies are grouped by areas of research. Provides an overview of the major works devoted to the study of the kinematics of rolling cutter bits, the interaction of elements of armament bits with destructible rock, determination and effort to analyze the stress state of the elements of arms and legs roller bits using different experimental methods and mathematical modeling. The analysis of the known results of the studies in this direction is not exhaustive, but may be useful for further study of this issue.

Keywords: drilling, drill bit, milling cutter, slaughter, breed, support, armament of the milling cutter, the load.

Моделированием работы шарошечных долот и изучением основных закономерностей взаимодействия вооружения шарошечных долот с забоем для определения кинематических и силовых характеристик работы шарошечных долот в разные годы занималось большое число исследователей, так, например, Бирюков И.М., Блинков О.Г., Долгушин В.В., Егерев А.Ф., Комм Э.Л., Попов А.Н., Пяльченков В.А., Симонов В.В., Спивак А.И., Трушкин Б.Н., Эйгелес Р.М. и др. Такой интерес к данной тематике, объясняется ее большой практической значимостью. От эффективности работы бурового инструмента во многом зависят экономические показатели строительства скважин. Вместе с тем, результаты исследований зачастую носят противоречивый характер, что вполне объяснимо высокой сложностью

процессов, происходящих при работе долота на забое. По мнению автора, анализ известных результатов по данному направлению может быть полезен при проведении дальнейших исследований. При составлении обзора наряду с оригинальными работами использовались материалы, приведенные в работах [5, 20].

В ранних исследованиях, например, [3, 7, 13] и других, предпринимаются попытки моделировать работу долота с целью определения основных кинематических закономерностей движения шарошек по забою. Установлено, что венцы шарошек перекатываются по забою с проскальзыванием. В связи с этим предлагаются аналитические зависимости для определения положения мгновенных осей вращения шарошки, траекторий движения точек шарошки, частот вращения шарошек. При этом шарошка рассматривается как гладкий одно- или многоконусный каток, перекатывающийся по недеформируемому забою.

Моделированию механизма взаимодействия вооружения долот с разрушаемой породой посвящены работы [14, 22, 24]. Зуб долота вдавливается в породу осевой силой и одновременно совершает сложное движение, зависящее от параметров вращения шарошки и долота, проскальзывая по забою. В это же время соседний зуб движется к поверхности породы и наносит по ней удар. В следующие моменты времени нагрузка перераспределяется с первого зуба на второй, а далее первый зуб выходит из контакта с горной породой. Экспериментальные исследования взаимодействия отдельных элементов вооружения долота с горной породой выполнены по схеме бурения одним зубом.

В большинстве проводимых экспериментальных исследований угловая скорость шарошки усреднялась в пределах одного оборота. Однако, в результате экспериментальных исследований, проведенных на специальном стенде, позволяющем изучать силовые и кинематические параметры серийных шарошечных долот при прямом бурении породы, было установлено [1], что мгновенные передаточные отношения шарошек изменяются в 1,4...1,75 раза в пределах одного оборота. При этом минимумы мгновенного передаточного отношения приходятся на вертикальные относительно забоя положения зубьев.

В работах [2, 24, 25] предлагаются аналитические зависимости для определения скоростей соударения и движения в контакте с забоем элементов вооружения зубчатого венца шарошки, а также нелинейные зависимости между углами поворота венца вокруг своей оси и вокруг оси долота при работе на деформируемом забое. Используя в данной модели в качестве критерия оптимизации износостойкость, автор [2] за счет варьирования геометрическими параметрами определяет их оптимальное соотношение. При анализе принималось, что глубина погружения зубьев в породу учитывается только для определения рабочих участков зубьев. Сила сопротивления движению в контакте с

породой является постоянной в течение времени контакта, хотя известно, что сила сопротивления породы разрушению зависит от многих факторов и изменяется в широких пределах, как по величине, так и по направлению.

В работе [25] и других используется интересная математическая модель работы шарошечного долота, описывающая взаимодействие в системе «бурильная колонна — долото — забой». Модель представляет собой совокупность взаимосвязанных модулей расчета кинематики и динамики долота, колебаний бурильной колонны, а также формирования и углубления забоя при бурении. Модель позволяет для заданного сочетания параметров конструкции долота и бурильной колонны, режима и условий бурения определить для любого момента времени бурения распределение сил и перемещений любой точки бурильного инструмента, начиная от верхнего конца бурильной колонны и кончая вершинами зубков шарошек долота. Однако, ввиду отсутствия аналитического решения задачи об определении реакции породы, действующей на вершины зубьев, на каждом шаге реализации данной математической модели долота необходимо использовать результаты, полученные экспериментально на стенде, в котором взаимодействие зубка с породой, в отличие от реальных условий, обеспечивается за счет жесткой кинематической связи.

Различные математические модели шарошечных долот для аналитического определения усилий, действующих на подшипники опоры шарошек, предлагаются в работах [9, 15, 17-19]. В [9, 15] предполагается, что осевая нагрузка распределена равномерно между всеми шарошками, а реакция забоя пропорциональна ширине зубков. Из рассмотрения условий равновесия шарошки и лапы, а также дополнительных условий деформации определяются искомые усилия. При этом, если в работе [9] учитываются деформации цапфы и тела шарошки, а контактными деформациями и зазорами в подшипниках пренебрегают, то в работе [15] наоборот, учтены лишь контактные деформации и зазоры в подшипниках. В результате авторы приходят к диаметрально противоположным выводам. По данным [9] шариковый замковый подшипник воспринимает самую большую радиальную нагрузку, по данным [15] нагрузка, действующая на этот подшипник, минимальна. В работах [17, 18] в качестве модели рассмотрена шарошка, установленная на цапфе на трех подшипниках качения и нагруженная осевой силой, приложенной на определенном расстоянии от оси долота. Так как система сил, действующих на шарошку, является статически неопределимой, то для ее решения составлены дополнительные уравнения деформации системы. При этом учитывалась деформация цапфы и контактные деформации в подшипниках. Расчет величины контактных напряжений в подшипниках по данной методике показывает, что наибольшие напряжения возникают в шариковом замковом подшипнике. Это соответствует выводам ряда экспериментальных исследований, утверждающих, что шариковый подшипник работает в

наиболее тяжелых условиях.

Во ВНИИБТ были разработаны методика и комплекс устройств и средств измерения для экспериментального определения нагрузок, воспринимаемых каждой шарошкой (секцией) во время их работы на забое [8]. Методика заключается в экспериментальном определении нагрузки, действующей на каждую секцию модели шарошечного долота во время ее работы по забою, с последующей аналитической оценкой распределения этих нагрузок между подшипниками опоры. Однако при разработке этой методики были сделаны допущения, которые уменьшают достоверность определяемого силового воздействия на шарошку.

Наглядная иллюстрация характера распределения нагрузки, между подшипниками опоры шарошечного долота в зависимости от точки приложения реакции забоя на шарошку получена с использованием модели шарошечного узла, изготовленной из оптически-чувствительного материала [16].

Наиболее просто нагрузки, действующие на зубья шарошки долота в процессе бурения, определяются непосредственным измерением с помощью тензометрических датчиков, наклеенных на боковые поверхности зубьев [21]. Трудности замера усилий в этом случае заключаются в том, что зубья имеют малые размеры и шарошки, с наклеенными на них датчиками, вращаются. Результаты этих исследований показали, что периферийный венец является более нагруженным и нагрузка, воспринимаемая им втрое больше, чем на вершинном венце.

Для экспериментальной оценки нагруженности элементов вооружения шарошечных долот используется также принцип дифференциации забоя [10]. Забой выполнен в виде трех концентрических, стальных колец, опирающихся на измерительное устройство, что позволяет замерить суммарные осевые нагрузки и крутящие моменты, действующие на одноименные венцы всех шарошек долота, но не дает представления о распределении нагрузок по вооружению каждой шарошки. Возможность отдельного определения усилий, действующих на венцы каждой шарошки, дает дополнительная дифференциация забоя на два сектора, рабочий (измерительный) и нерабочий [20]. Результаты исследований показали, что для долот типа 215,9К-ПВ наибольшую осевую нагрузку воспринимают средние венцы. Существенным недостатком данного метода является необходимость использования металлического забоя.

В работе [23] описано устройство, для измерений и регистрации осевой нагрузки, крутящего и изгибающего моментов, действующих на долото в процессе бурения породы. Используются современные средства записи и расшифровки силовых параметров работы долота. Замеры в стендовых условиях проводились для мрамора. Получены данные по энергоемкости разрушения мрамора, скачкам разрушения, динамичности крутящего

момента, осевой и поперечной сил для шарошечных долот и долот режуще-скалывающего действия. Установлено, что долота в основном работают в пределах третьего скачка разрушения.

Конечно-элементная модель долота, учитывающая различные комбинации контакта зубков с забоем скважины, податливость забоя, геометрию зубков и элементов опоры и позволяющая получать оценку реальных нагрузок на каждую из секций, предложена в работе [11]. Зубки шарошек моделируются набором из 6-и стержней заданной жесткости. В отличие от модели долота в сборе [12] здесь дополнительно учитывается наличие различных вариантов контакта зубков с забоем, приводящих к изменению величины и направления равнодействующей нагрузки на секции долота, податливость забоя под действием зубков с различной геометрией вершин.

Исследование кинематики и кинетики зубчатого венца шарошки на забое приведено в работе [4]. Вычислены передаточные отношения шарошек и кинетические показатели оценки их работоспособности: относительная скорость движения зубьев в контакте с породой; контактная работа разрушения; относительная удельная объемная работу разрушения. Но исследование проводится при равномерном вращении шарошки вокруг своей оси, что не соответствует реальным условиям [1].

Значительный интерес представляют результаты комплексных теоретических и экспериментальных исследований нагруженности элементов шарошечного долота, представленных в работах [5, 6]. В результате теоретических исследований получены аналитические зависимости для определения сил, действующих на шарошку со стороны разрушаемой породы. Однако в полученные зависимости входят коэффициенты, которые необходимо определять экспериментально. Предложен метод раскрытия статической неопределимости подшипникового узла, позволяющий установить зависимость распределения усилий по элементам подшипникового узла от величины сил, действующих на шарошку, и геометрических параметров опорного узла. Для экспериментальных исследований нагрузок, действующих на шарошку, было использовано устройство, разработанное во ВНИИБТ [8]. При этом была усовершенствована методика исследований, предложена новая схема реакции забоя. Предложена также функция цели для оптимизации геометрии шарошечного долота на основе разработанных критериев эффективности и износостойкости вооружения. Полученные аналитические зависимости достаточно сложны и требуют для решения использования численных методов.

За рамками данного обзора осталось еще очень большое число работ, посвященных исследованию нагруженности вооружения и подшипников опор шарошечных долот.

Список литературы

1. Абдуллин М.М. Разработка нового вооружения для долота типа С на базе экспериментального изучения его взаимодействия с забоем при бурении: дис...канд. техн. наук. – Уфа, 1985. – 184 с.
2. Биланенко Н.А. Установление оптимальных кинетических характеристик шарошечных долот с целью повышения эффективности бурения скважин: дис...канд. техн. наук. – Ташкент, 1994. – 219 с.
3. Бирюков И.М. Научные обоснования конструирования шарошечных долот для бурения скважин в крепких породах: Авторефер. дис. д.т.н. – М., 1958. – 23 с.
4. Блинков О.Г. Пути повышения эффективности работы буровых шарошечных долот: дис....докт. техн. наук. – М., 2007. – 238 с.
5. Долгушин В.В. Развитие методологии моделирования процессов технологии бурения и скважинных механизмов: дис.... докт. техн. наук. – Тюмень. 2008. – 260 с.
6. Долгушин В.В., Кулябин Г.А. Метод расчета усилий в подшипниковом узле шарошки бурового долота // Известия вузов. Нефть и газ. – 2012. - № 2. – С. 49-56.
7. Егерев А.Ф. Теоретические основы конструирования и эксплуатации долот. – М.: Гостоптехиздат, 1945. – 47 с.
8. Комм Э.Л., Перлов Г.Ф., Мокшин А.С. Исследование нагруженности секций шарошечного долота // Труды ВНИИБТ. – М., 1976. – Вып. 36. – С. 27-36.
9. Ланглебен М.А. К расчету опор шарошечного долота // Азербайджанское нефтяное хозяйство. – 1955. - № 11. – С. 19-22.
10. Мардахаев А.А., Рубарх В.М., Коровинских Л.Н. Устройство для замера распределения усилий и моментов по венцам шарошечных долот // Машины и нефтяное оборудование: РНТС ВНИИОЭНГ. – М., 1976. - № 10. – С. 27-29.
11. Морозов Л.В. Повышение долговечности буровых долот на основе компьютерного анализа элементов конструкций и их сборки: дис....канд. техн. наук. – Самара. 2003. – 180 с.
12. Неупокоев В.Г. Вопросы теории и практики проектирования, производства и эксплуатации буровых шарошечных долот. – Самара: Изд.-во Самарского науч. центра РАН, 2000. – 376 с.
13. Поляков В.С. Вопросы механики работы шарошечных долот // Труды ЛПИ им. М.И.Калинина. – 1957. - № 191. – С. 235-266.
14. Попов А.Н., Спивак А.И., Трушкин Б.Н. Изучение механических процессов в горных породах и породоразрушающих инструментах при бурении скважин // Нефтяное хозяйство. – 2002. - № 11. – С. 36-38.

15. Посташ С.А. О расчете опор трехшарошечных долот // Известия вузов. Нефть и газ. – Баку, 1959. - № 8. – С. 91-98.
16. Пяльченков В.А. Исследование распределения нагрузки между подшипниками опоры шарошечного долота с использованием фотоупругой модели // Известия вузов. Нефть и газ. – 2014, № 1. – С. 57-61.
17. Пяльченков В.А. Аналитическое определение реакций в опорах шарошечного долота // Известия вузов. Нефть и газ. – 2014. - № 3. – С. 66-72.
18. Пяльченков В.А. К оценке долговечности подшипников опоры шарошечного долота // Современные проблемы науки и образования. – 2014. - №6; URL: www.science-education.ru/120-16677 (дата обращения: 12.01.2015).
19. Пяльченков В.А. Аналитическое исследование деформируемости деталей шарошечного долота // Современные проблемы науки и образования. – 2015. - №1; URL: www.science-education.ru/121-17246 (дата обращения: 02.02.2015).
20. Пяльченков В.А. Методы исследования нагруженности вооружения и подшипников опоры шарошечных долот // Известия вузов. Нефть и газ. – 2015. - № 1.
21. Симонов В.В., Выскребцов В.Г. Работа шарошечных долот и их совершенствование. – М.: Недра, 1975. – 240 с.
22. Спивак А.И., Попов А.Н. Разрушение горных пород при бурении скважин: учеб. для вузов. – М.: Недра, 1994. – 261 с.
23. Трушкин О.Б. Анализ силовых и энергетических параметров работы породоразрушающих инструментов на базе разработанного автономного цифрового измерительного устройства: дис....канд. техн. наук. – Уфа, 2006. – 200 с.
24. Шамансуров И.И., Стеглянов Б.Л. Кинематика шарошечных долот. – Ташкент: 1977. – 103 с.
25. Эйгелес Р. М., Левина А. Б., Лубяный Д. А. Моделирование кинематики и динамики шарошечных долот// Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 1993. - № 1-2. – С. 41-43.

Рецензенты:

Долгушин В.В., д.т.н., профессор, директор Института промышленных технологий и инжиниринга ФГБОУ ВПО «Тюменский Государственный нефтегазовый университет», г. Тюмень;

Бабичев Д.Т., д.т.н., профессор кафедры «Прикладная механика» ФГБОУ ВПО «Тюменский Государственный нефтегазовый университет», г. Тюмень.