УДК 622. 24.051

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НАГРУЖЕННОСТИ ВООРУЖЕНИЯ И ПОДШИПНИКОВ ОПОР ШАРОШЕЧНЫХ ДОЛОТ

METHODS OF STUDY OF THE LOAD DEGREE OF EQUIPMENT AND CONE DRILL BIT BEARINGS

В. А. Пяльченков
V. A. Pialchenkov

Тюменский государственный нефтегазовый университет, г. Тюмень

Ключевые слова: ***бурение; долото; шарошка; опора; нагрузка***
Key words: ***drilling; drill bit; cone bearing; the load***

Вопросу изучения основных закономерностей силового взаимодействия с забоем вооружения шарошечных долот с целью определения кинематических и силовых характеристик работы шарошечных долот посвящено значительное число аналитических и экспериментальных исследований. Большинство аналитических методов связано с изучением кинематических характеристик долота.

В работах [1, 2, 3] и ряде других рассматриваются закономерности движения шарошек по забою, предлагаются аналитические зависимости для определения положения мгновенных осей вращения шарошки, траекторий движения точек шарошки и других характеристик. В большинстве работ шарошка рассматривается как гладкий каток, перекатывающийся по недеформируемому забою.

Экспериментальные исследования [4, 5] показали, что закономерности движения зубчатых шарошек по реальному забою отличаются от результатов, полученных на

основе принятых моделей. Это объясняется весьма сложным характером реального взаимодействия долота с забоем.

В работе [6] предлагается кинематическая модель шарошечного долота, учитывающая внедрение зубков в породу. Однако эта методика, как и другие, не учитывает реальный характер распределения реакции забоя вдоль образующей шарошки. Априорно принимается либо равномерное распределение, либо изменяющееся по трапецеидальному или параболическому закону с максимумом на периферийном венце. При аналитическом рассмотрении процесса качения гладкой шарошки с прерывистой образующей по деформируемому забою [7] делается вывод о том, что наиболее нагруженными являются периферийные венцы. При этом предполагается, что деформация забоя подчиняется закономерностям вязко-пластического течения вещества и неравномерность распределения нагрузки связана с уменьшением скорости деформации при удалении от центра забоя скважины.

В работе [8] предлагается метод расчета величины усилий, действующих на каждую шарошку для вариантов статического взаимодействия шарошек с забоем. Заменяя долото стержневой системой (рис. 1) и рассматривая условия равновесия этой системы, автор приходит к выводу, что наибольшую осевую нагрузку воспринимает шарошка, опирающаяся на вершинный венец. Однако достоверность результатов вызывает сомнения, так как замена долота стержневой системой чрезмерно упрощает расчетную схему и не является оправданной.

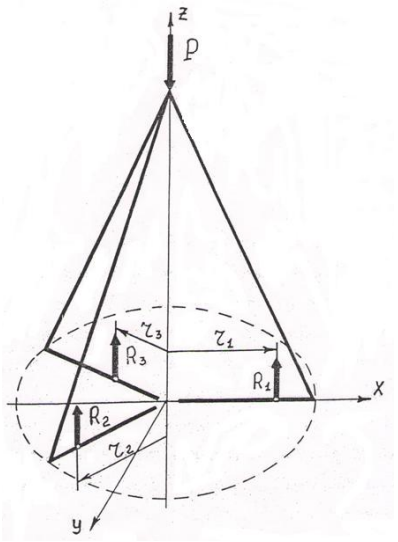

Рис. 1. ***Расчетная схема к определению осевых усилий***

Методы аналитического определения усилий, действующих на подшипники опоры шарошечного долота, предлагаются в работах [9, 10]. В них предполагается, что осевая нагрузка распределена равномерно между всеми шарошками, а реакция забоя пропорциональна ширине зубков. Из 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 [10], наоборот, учтены лишь контактные деформации и зазоры в подшипниках. В результате авторы приходят к диаметрально противоположным выводам. По данным статьи [9], шариковый замковый подшипник воспринимает самую большую радиальную нагрузку, по данным, представленным в другой работе [10] нагрузка, действующая на этот подшипник, минимальна.

Значительный интерес представляют результаты комплексных теоретических и экспериментальных исследований нагруженности элементов шарошечного долота, представленных в работах [11, 12, 13]. 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 [14]. В работе [11] предложена также функция цели для оптимизации геометрии шарошечного долота на основе разработанных критериев эффективности и износостойкости вооружения. Полученные аналитические зависимости достаточно сложны и для решения требуют использования численных методов.

Метод аналитического определения реакций в подшипниках опоры шарошечного долота предложен в работе [15]. В качестве модели рассмотрена шарошка, установленная на цапфе на подшипниках качения и нагруженная осевой силой P , приложенной на расстоянии R от оси долота (рис. 2).

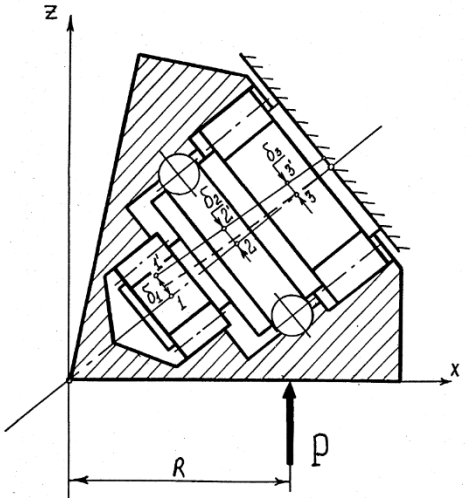

Рис. 2. ***Расчетная схема шарошечного узла***

Шарошка должна находиться в равновесии под действием внешней силы P и сил реакций в подшипниках. Принято, что периферийный и концевой роликовые подшипники воспринимают только радиальные нагрузки, а шариковый замковый подшипник — осевую и радиальную (рис. 3).

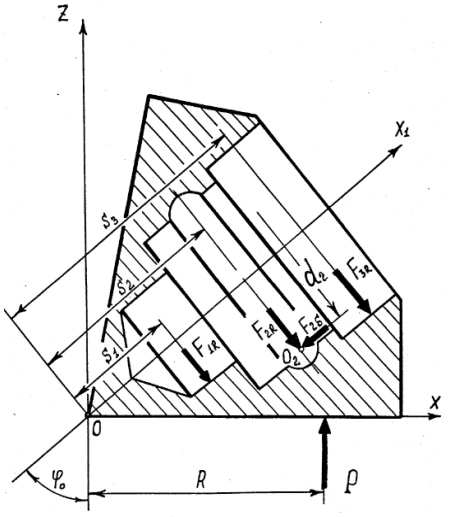

Рис. 3. ***Схема сил, действующих на шарошку***

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. По результатам расчетов построены зависимости величины реакций в подшипниках от радиуса приложения силы к шарошке для конкретного долота 215,9К-ПВ (рис. 4). 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.

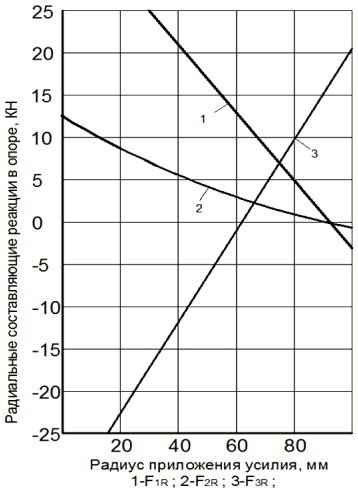

Рис. 4. ***Расчетные зависимости радиальных реакций в подшипниках от радиуса приложения внешнего усилия (P = 10 КН)***

Создание надежной методики аналитической оценки нагруженности элементов долота для применения ее на практике невозможно без экспериментального подтверждения результатов расчетов. В связи с этим представляют большой интерес экспериментальные методы, применяемые для решения данных задач.

Наиболее просто нагрузки, действующие на зубья шарошки долота в процессе бурения, определяются непосредственным измерением с помощью тензометрических датчиков, наклеенных на боковые поверхности зубьев [5]. 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. В работе [8] приведены результаты экспериментального определения осевых усилий, действующих на зубки шарошек с твердосплавным вооружением. Долото, опирающееся зубками шарошек на специальные динамометры, нагружалось осевой силой (рис. 5).

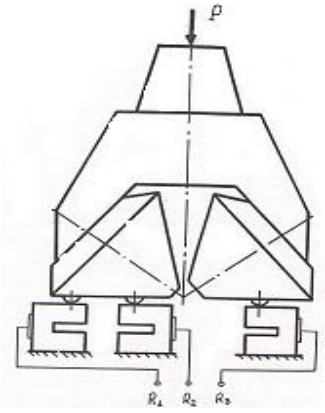

Рис. 5. ***Схема замера усилий на венцы***

Были исследованы различные варианты, когда шарошки могли опираться на один, два или три зубка, расположенных на разных венцах. По полученным результатам трудно установить какую-либо закономерность. Наблюдается тенденция к большей загруженности вершинных венцов. Однако полученные результаты вряд ли отражают реальную картину, так как для предотвращения поворота при нагружении шарошки осевой нагрузкой последние приваривались к лапам долота. Очевидно, что это дополнительное крепление шарошек существенно изменяло жесткость конструкции, приближая ее к стержневой системе.

Интересен метод измерения усилий, действующих на подшипники опоры шарошки при динамическом нагружении [16]. Измерения проводились на разборном долоте с помощью тензометрических датчиков, наклеенных в специальных проточках на сменных кольцах, наружные поверхности которых служили беговыми дорожками подшипников. Несмотря на преимущества прямого измерения усилий, этот метод имеет и ряд недостатков. Усилия измеряются в фиксированных точках опорных поверхностей подшипников, в то время как фактические точки приложения нагрузок могут перемещаться во время работы долота вдоль цапфы или смещаться на некоторый угол от вертикальной плоскости, в которой расположены датчики.

Попытка связать нагруженность подшипников опор шарошек долота с конструкцией вооружения и технологическими параметрами изготовления долота представлена в работе [17]. 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. Модель долота составлена из трех шарошечных узлов, каждый из которых установлен на цилиндрической измерительной балке, жестко закрепленной на базовой плите (рис. 6).

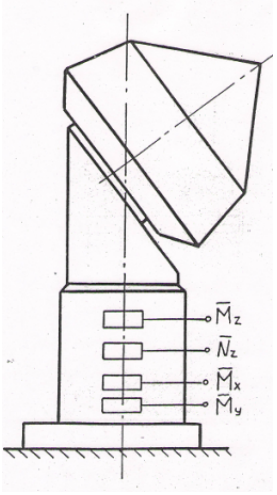

Рис. 6. ***Схема одной секции модели долота***

Сверху на модель долота опирается вращающийся забой. С помощью смонтированных на балке тензодатчиков определяются вертикальная нагрузка на секцию, крутящий и изгибающие моменты. Затем с помощью гипотез и допущений производится расчет нагрузок, действующих на подшипники. Данная методика позволяет определить нагрузку, действующую на каждую секцию долота, достаточно просто моделировать такие погрешности изготовления долота, как разновысотность и радиальное биение секций и их влияние на распределение нагрузки по секциям. К достоинствам методики можно отнести и возможность проведения испытаний на забое, изготовленном из реальной горной породы.

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 [18]. На рис. 7 представлена схема приспособления для закрепления и нагружения модели шарошечного узла.

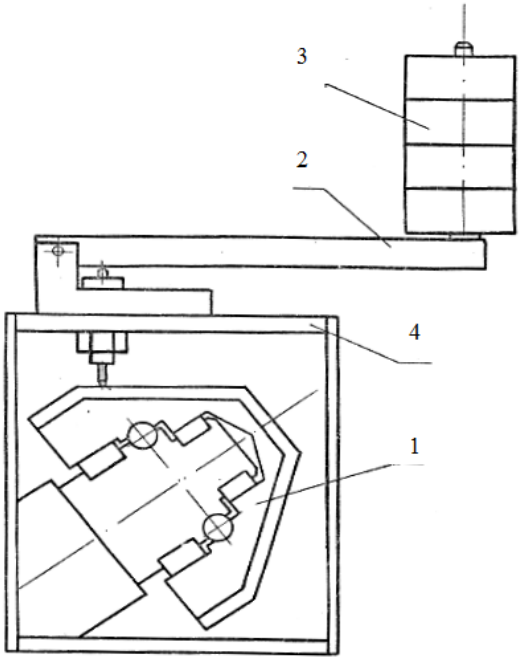

Рис. 7. ***Схема приспособления для закрепления и нагружения фотоупругой модели шарошечного узла***

При помещении модели в поле кругового полярископа на экране появляется система темных линий, называемых изохромами или полосами. Каждая полоса представляет собой геометрическое место точек, имеющих одинаковую разность главных напряжений. На рис. 8 представлена картина полос модели, нагруженной осевой силой в 300 Н. Стрелка на рисунке показывает место приложения и направление осевой силы.

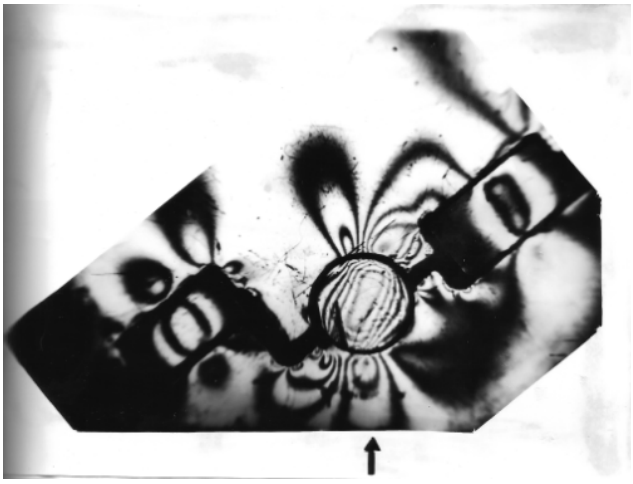

Рис. 8. ***Картина полос модели шарошечного узла***

Для экспериментальной оценки нагруженности элементов вооружения шарошечных долот используется также принцип дифференциации забоя [19]. Забой выполнен в виде трех концентрических стальных колец. С помощью гидротелескопического устройства, схема которого приведена на рис. 9, можно замерить суммарные осевые нагрузки и крутящие моменты, действующие на одноименные венцы всех шарошек долота, что не позволяет получить полное представление о распределении нагрузок по вооружению каждой шарошки.

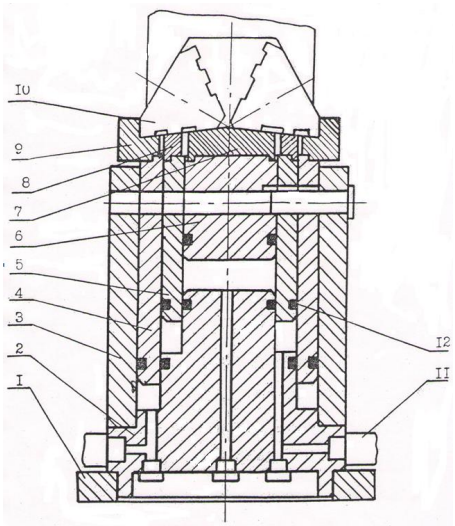

Рис. 9. ***Схема гидротелескопического устройства:***
1, 2, 3 — детали корпуса;
4, 5, 6 — плунжеры;
7, 8, 9 — кольцевой забой;
10 — долото; 11 — датчики;
12 — уплотнения

Возможность раздельного определения усилий, действующих на венцы каждой шарошки, дает дополнительная дифференциация забоя на два сектора — рабочий (измерительный) и нерабочий [20]. На рис.10 представлена принципиальная схема замера и регистрации усилий взаимодействия зубьев шарошек с забоем. При вращении долота по забою шарошки последовательно контактируют с рабочим сектором забоя, угол которого выбран таким образом, что в нем может одновременно находиться только одна шарошка долота.

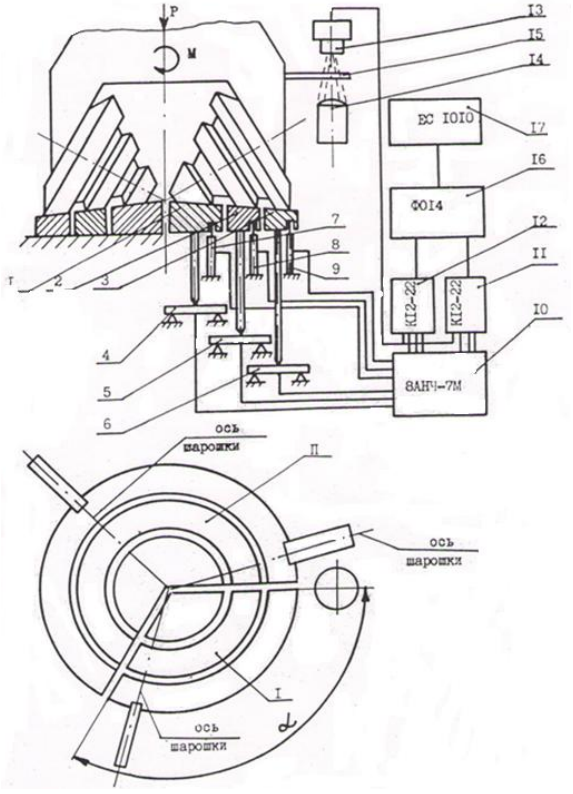

Рис.10. ***Принципиальная схема замера и регистрации реакций взаимодействия зубьев шарошек с забоем:*** *1, 2, 3 — кольцевой забой рабочего сектора;*
4, 5, 6, 7, 8, 9 — тензометрические балки; 10 — усилитель; 11, 12 — осциллографы;
13, 14, 15 — фотосчетчик; 16, 17 — преобразователь графиков

Остальные шарошки в это время контактируют с нерабочим сектором забоя, неподвижно закрепленным на корпусе измерительного устройства. Данная методика позволяет достаточно быстро и с высокой точностью оценить величины осевых и тангенциальных усилий, действующих на каждый венец каждой шарошки. Результаты исследований показали, что для долот типа 215,9К-ПВ наибольшую осевую нагрузку воспринимают средние венцы. Результаты исследований позволяют оптимизировать конструкцию вооружения и опорных узлов шарошек.

За рамками данного обзора осталось еще очень большое число работ, посвященных исследованию нагруженности вооружения и подшипников опор шарошечных долот. Такой интерес исследователей к данной тематике объясняется ее большой практической значимостью, так как от эффективности работы бурового инструмента существенно зависят технологические и экономические параметры процесса бурения скважин. Кроме того, из-за высокой сложности процессов, происходящих при работе долота на забое, трудно выявить их основные закономерности.

Список литературы

1. Бирюков И. М. Научные обоснования конструирования шарошечных долот для бурения скважин в крепких породах. Автореферат диссертации на соискание ученой степени д. т. н. – М.: 1958. – 23 с.
2. Егерев А. Ф. Теоретические основы конструирования и эксплуатации долот. – М.: Гостоптехиздат, 1945. – 47 с.
3. Поляков В. С. Вопросы механики работы шарошечных долот // Труды ЛПИ им. М. И. Калинина. – 1957. – № 191. – С. 235-266.
4. Кручинин И. Г. Экспериментальное исследование некоторых вопросов механики работы буровых шарошечных долот. Автореф. дисс. … к. т. н. – Л., 1962. – 22 с.
5. Симонов В. В., Выскребцов В. Г. Работа шарошечных долот и их совершенствование. – М.: Недра, 1975. – 240 с.
6. Шамансуров И. И., Стеклянов Б. Л. Кинематика шарошечных долот. – Ташкент: 1977. – 103 с.
7. Абдулзаде А. М. Исследование процесса разрушения пород при бурении ступенчатыми долотами. Автореф. дисс. … д. т. н. – М.,1975. – 48 с.
8. Лысенко В. Н. Экспериментально-теоретическое обоснование конструкции шарошечных долот с равно нагруженными секциями. Автореф. дисс. … к. т. н. – Караганда, 1972. – 23 с.
9. Ланглебен М. А. К расчету опор шарошечного долота // Азербайджанское нефтяное хозяйство. – 1955. – № 11. – С. 19-22.
10. Посташ С. А. О расчете опор трехшарошечных долот // Известия вузов. Нефть и газ. – Баку, 1959. – № 8. – С. 91-98.
11. Долгушин В. В. Развитие методологии моделирования процессов технологии бурения и скважинных механизмов: автореф. дис. … д. т. н. – Тюмень, 2008. – 50 с.
12. Кулябин Г. А., Долгушин В. В., Наумов И. А., Касимов М. М. К совершенствованию конструкций элементов буровых долот и повышению эффективности углубления скважин // Известия вузов. Нефть и газ. – 2007. – № 7. – С. 24-29.
13. 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.
14. Комм Э. Л., Перлов Г. Ф., Мокшин А. С. Исследование нагруженности секций шарошечного долота // Труды ВНИИБТ. – М., 1976. – Вып. 36. – С. 27-36.
15. Пяльченков В. А. Аналитическое определение реакций в опорах шарошечного долота // Известия вузов. Нефть и газ. – 2014. – № 3. – С. 66-72.
16. Посташ С. А., Касинцев А. А. Измерение усилий в подшипниках опоры долота // Машины и нефтяное оборудование: РНТС ВНИИОЭНГ. – 1975. – № 7. – С. 29-31.
17. Комм Э. Л. Исследование влияния конструктивных и технологических факторов на работоспособность, износ и нагруженность опор шарошечных долот. Автореф. дисс. … к. т. н. – М., 1978. – 28 с.
18. 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.
19. 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. – 1976. – № 10. – С. 27-29.
20. Виноградов В. Н., Брагин А. Ф., Пяльченков В. А. Метод исследования нагруженности вооружения шарошечных долот // Машины и нефтяное оборудование: РНТС ВНИИОЭНГ. – 1981. – № 1. – С. 18-21.

Сведения об авторе

Пяльченков Владимир Алексеевич, *к. т. н., доцент кафедры «Прикладная механика», Тюменский государственный нефтегазовый университет, г. Тюмень,тел. 83452200790, e-mail: pial228@rambler.ru*

Information about the authors

Pialchenkov V.A.*, Candidate of Science in Engineering, associate professor of the chair «Applied mechanics», Tyumen State Oil and Gas University, phone: 83452200790, e-mail: pial228@rambler.ru*